

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Oleh :

**SYAFRI YANDI OKSIA PUTRA**

**11655103579**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU**

**PEKANBARU**

**2021**

# LEMBAR PERSETUJUAN

## PERANCANGAN KENDALI HYBRID *LINEAR QUADRATIC REGULATOR* (LQR)-PD PADA KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC

### TUGAS AKHIR

oleh:


**SYAFRI YANDI OKSIA PUTRA**

**11655103579**

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro  
di Pekanbaru, pada tanggal 2 Juli 2021

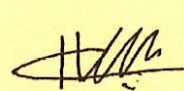
**Ketua Program Studi**

**Teknik Elektro**

 Digitally  
signed by  
Ewi  
Ismaredah  
Tanggal:  
2021.07.19  
09:30:15 WIB

**Ewi Ismaredah S.Kom.,M.Kom**  
**NIP. 19750922 200912 2 002**

**Pembimbing I**

 Digitally  
signed  
by Halim  
Mudia

**Halim Mudia,ST.,MT**  
**NIK. 130517053**



# LEMBAR PENGESAHAN

## PERANCANGAN KENDALI HYBRID *LINEAR QUADRATIC REGULATOR* (LQR)-PD PADA KECEPATAN MOTOR BURSHLESS DC

### TUGAS AKHIR

oleh:

**SYAFRI YANDI OKSIA PUTRA**  
**11655103579**

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik  
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau  
di Pekanbaru, pada tanggal 2 Juli 2021

Pekanbaru, 2 Juli 2021

Mengesahkan,

Dekan



**Dr. Drs. Hartono, B.A., M.Pd**  
**NIP. 19640301 199203 1 003**

Ketua Program Studi

Teknik Elektro

Digitally  
signed by  
Ewi  
Ismaredah  
Tanggal:  
2021.07.19  
09:30:40 WIB

**Ewi Ismaredah S.Kom., M.Kom**  
**NIP. 19750922 200912 2 002**

Dewan Penguji :

Ketua      Jufrizel., S.T., M.T

Sekretaris      Halim Mudia., S.T., M.T

Anggota 1      Ahmad Faizal., S.T., M.T

Anggota 2      Aulia Ullah., S.T., M.Eng

Digitally  
signed by  
Ahmad  
Faizal  
Tanggal:  
2021.07.13  
09:28:27  
WIB

Digitally  
signed by  
Halim Mudia

Digitally signed  
by Aulia Ullah  
Date:  
2021.07.15  
14:45:18 +07'00'

## LEMBAR HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang yang saya ketahui, saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang telah dilampirkan dalam referensi dan dalam daftar pustaka.

Saya bersedia menerima sanksi jika pernyataan ini tidak sesuai dengan yang sebenarnya.

Pekanbaru, 2 Juli 2021

Yang membuat pernyataan,

**SYAFRI YANDI OKSIA PUTRA**  
**NIM. 11655103579**

UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



## LEMBAR PERSEMBAHAN

*"Dan Katakanlah: "Bekerjalah kamu, maka Allah dan Rasul-Nya serta orang-orang mu' min akan melihat pekerjaanmu itu, dan kamu akan dikembalikan kepada (Allah) Yang Mengetahui akan yang ghaib dan yang nyata, lalu diberitakan-Nya kepada kamu apa yang telah kamu kerjakan." (QS. At-Taubah : 105)*

Usaha tidak akan menkhianati hasil walaupun banyak rintangan suatu saat pasti akan ada jalan, begitulah perjalanan perkuliahanmu hingga aku mencapai kedepan pintu gerbang sarjana. Ini semua tidak akan terjadi kalau Allah tidak mengizinkan, maka semua rasa syukur ini kupersembahkan kepadamu ya Rabb.

*Katakanlah (Muhammad), "Sesungguhnya salatku, ibadahku, hidupku dan matiku hanyalah untuk Allah, Tuhan seluruh alam, (QS. Al-An'am: 162)*

Ya Allah aku ini hanya hambamu yang lemah ya Allah, biarkanlah hambamu tetap menjadi hambamu yang selalu bertakwa ya Allah, tidak ada yang pantas dipuji setinggi tingginya selainmu ya Allah maka dari itu luruskan niat hambamu ini ya Allah, jauhkanlah aku dari hal-hal yang tidak engkau ridhoi ya Allah, istiqomahkanlah hamba untuk tetap di jalanmu ya Allah..

*Katakanlah (Muhammad), "Wahai manusia! Sesungguhnya aku ini utusan Allah bagi kalian semua. (QS. Al-A'raf: 158)*

Nabi Muhammad adalah suri tauladan yang baik, biarkanlah aku menjadi mengikut setia beliau ya Allah, beribu pengorbanan, air mata, dan darah beliau agar dapat mengangkat kalimat tauhid. Atas jasa beliau dan izin engkau kami dapat merasakan nikmat keislaman dan menjauhkan kami dari perbuatan jahiliyyah.

*"Ridha Allah tergantung pada ridha orang tua dan murka Allah tergantung pada murka orang tua". (HR At-Tirmidzi: 1899, HR. Al-Hakim: 7249, Ath-Thabrani Al-Bazzar: 2394,*

*Hadis Hasan)*

Ya Allah alasan aku bisa sampai ketahap ini berkat dukungan dan keridhoan-Mu dan orang tuaku ya Allah kuatkanlah hati mereka ya Allah, semoga keikhlasan hati mereka bernilai pahala disisimu ya Allah hingga kelak aku bisa membalas jasa-jasa mereka walaupun tidak sebanding dengan yang mereka berikanku.

*Tahap selanjutnya akan lebih berat dari pada sebelumnya, berbekal dengan pelajaran dan pengalaman sebelumnya semoga kedepannya menjadi lebih baik,*

*Let the fun begin!*

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

# PERANCANGAN KENDALI HYBRID *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)* - PD PADA KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC

**SYAFRI YANDI OKSIA PUTRA**

**NIM:11655103579**

Tanggal Sidang : 2 juli 2021

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

JL. Soebrantas NO.155 Pekanbaru

## ABSTRAK

Motor *brushless* DC merupakan salah satu jenis dari motor DC konvensional yang memiliki keunggulan seperti kecepatan torsi yang baik, efisiensi yang tinggi, dan kecepatan yang tinggi karena tidak memiliki *brush*. Motor *brushless* DC memiliki parameter yang dapat dikendalikan diantaranya kecepatan dan posisi.. Salah satu pengendali yaitu LQR, namun pengendali LQR ini masih menimbulkan *error steady state* pada sistem, maka pengendali LQR ditambahkan dengan pengendali PD dalam meminimalkan *error steady state* yang di timbulkan dimana penentuan model referensi digunakan metode *trial and error* dan metode *heuristic* untuk menentukan nilai  $K_p$ , dan  $K_d$ . Penelitian menunjukkan bahwa setelah penambahan pengendali PD pada LQR terlihat bahwa penambahan PD dapat meminimalkan *error steady state* yang di timbulkan pengendali LQR, dengan demikian pengendali LQR-PD mampu menghasilkan performansi yang lebih baik dibandingkan pengendali LQR serta meminimalkan *error steady state* yang di timbulkan pengendali LQR, dimana didapatkan nilai-nilai parameternya adalah  $E_{ss}=0$  V,  $t_r=0.00168$  detik,  $t_s=0.00228$  detik,  $t_d=0.00045$  detik,  $M_p=0\%$ . Pada saat pengendali LQR-PD diberikan gangguan, pengendali LQR-PD tidak dapat meredam *error steady state* yang ditimbulkan saat diberikan gangguan sehingga masih terdapat *error steady state* sebesar 0.0208V.

**Kata Kunci :** Motor brushless DC, kecepatan, LQR, PD

# **DESIGN HYBRID CONTROL LINEAR QUADTRATIC REGULATOR (LQR)-PD ON BRUSHLESS DC MOTOR SPEEDS**

**SYAFRI YANDI OKSIA PUTRA**  
**STUDENT NUMBER: 11655103579**

*Date of Final Exam : 2 july 2021*

*Department of Electrical Engineering  
Faculty of Science and Technology  
Syarif Kasim State Islamic University of Riau  
Soebrantas Street , Number. 155 Pekanbaru*

## **ABSTRACT**

Brushless DC motor is one type of conventional DC motor which has advantages such as good torque speed, high efficiency, and high speed because it does not have a brush. Brushless DC motors have parameters that can be controlled including speed and position. One of the controllers is LQR, but this LQR controller still causes steady state errors in the system, so the LQR controller is added to the PD controller in minimizing the steady state error that is caused where the determination of the model The reference method is trial and error and heuristic method to determine the value of  $K_p$  and  $K_d$ . The research shows that after adding the PD controller to the LQR, it can be seen that the addition of PD can minimize the steady state error caused by the LQR controller, thus the LQR-PD controller is able to produce better performance than the LQR controller and minimize the steady state error caused by the LQR controller. where the parameter values obtained are  $E_{ss}=0V$ ,  $t_r=0.00168$  seconds,  $t_s=0.00228$  seconds,  $t_d=0.00045$  seconds,  $M_p=0\%$ . When the LQR-PD controller is disturbed, the LQR-PD controller cannot reduce the steady state error caused when the disturbance is given so that there is still a steady state error of  $0.0208V$ .

Keywords: DC brushless motor, speed, LQR, PD



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## KATA PENGANTAR



*Assalammu'alaikum wa rahmatullahi wa barakatuh.*

*Alhamdulillah Rabbil Alamin*, Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah swt, berkat rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan-NYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan Proposal Tugas Akhir yang berjudul **“PERANCANGAN KENDALI HYBRID LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)-PD PADA KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC”**. Shalawat beriringan salam semoga tetap tercurah kepada junjungan alam yakni Nabi Muhammad SAW. Proposal tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan dalam menyelesaikan Mata Kuliah **Tugas Akhir** di Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

Banyak sekali pihak yang telah membantu dalam menyusun proposal tugas akhir ini, baik secara moril maupun materil. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Orang tua dan keluarga besar yang telah mendoa'akan serta memberikan semangat dan dorongan sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Hairunas, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Plt
3. Bapak Dr. Drs. Hartono., B.A., M.Pd selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim-Riau
4. Ibu Ewi Ismaredah M.Kom selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melaksanakan penelitian tugas akhir.
5. Bapak Mulyono ST,.MT selaku Sekretaris Program Studi Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
6. Bapak Halim Mudia, ST,MT selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk membimbing serta

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- memotivasi penulis hingga dapat menyelesaikan proposal tugas akhir
7. Bapak Jufrizel, ST. MT selaku ketua sidang, bapak Ahmad Faizal, ST.MT dan bapak Aulia Ullah, ST. M.Eng selaku penguji yang telah menyempatkan dan meluangkan waktu ditengah kesibukan sehingga penulis bisa melewati proses demi proses dalam melaksanakan tugas akhir ini.
  8. Bapak / Ibu dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah memberikan ilmu dan motivasi dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
  9. Rekan-rekan Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang juga turut memberikan dorongan semangat kepada penulis untuk dapat menyelesaikan proposal tugas akhir.

Penulis menyadari dalam penulisan proposal tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan serta kesalahan, untuk itu penulis mengharapkan adanya masukan berupa kritik maupun saran dari berbagai pihak untuk kesempurnaan proposal ini.

Penulis berharap semoga proposal tugas akhir ini dapat berguna dan bermanfaat bagi siapa saja yang membacanya. *Wassalamu'alaikum wa rahmatullahi wa barakatuh.*

Pekanbaru, 2 Juli 2021

Penulis

UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL .....	iv
LEMBAR PERNYATAAN .....	v
LEMBAR PERSEMBAHAN .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR RUMUS .....	xv
DAFTAR SINGKAT .....	xvi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	I-1
1.2 Rumusan Masalah .....	I-4
1.3 Tujuan Masalah .....	I-4
1.4 Batasan Masalah .....	I-5
1.5 Manfaat Penelitian .....	I-5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Penelitian Terkait .....	II-1
2.2 Dasar Teori .....	II-2
2.2.1 Motor Brushless DC .....	II-2
2.2.2 Konstruksi Motor Brushless DC .....	II-4
2.2.3 Prinsip Kerja Motor Brushless DC .....	II-4
2.2.4 Model Matematika Motor Brushless DC .....	II-5
2.3 Linera Quadratic Regulator (LQR) .....	II-11
2.4 Pengendalian Sistem .....	II-15
2.4.1 Pengendali Propotional (P) .....	II-15
2.4.2 Pengendali Derevative (D) .....	II-16



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.5	Identifikasi Sistem.....	II-17
2.6	Kriteria Integral Menggunakan Integral Of Absolute Error (IAE) .....	II-18
2.7	Metode Heuristik.....	II-18
2.8	Matlab (Matrix Laboratory) .....	II-18

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Proses Alur Penelitian .....	III-1
3.2	Tahapan Penelitian .....	III-2
3.3	Pemodelan Matematis .....	III-3
3.4	Validasi Model Matematis .....	III-4
3.5	Perancangan Pengendali .....	III-5
3.5.1	Perancangan Pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR).....	III-5
3.5.2	Perancangan Pengendali LQR-PD .....	III-8
3.5.3	Perancangan Pengendali LQR-PD dengan Gangguan .....	III-12
3.6	Skenario Penelitian .....	III-12

### BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1	Gambaran Umum Analisa.....	IV-1
4.2	Analisa Sistem Kecepatan Motor Brushless DC Secara Open Loop .....	IV-1
4.3	Analisa Sistem Kecepatan Motor Brushless DC dengan pengendali LQR.....	IV-4
4.4	Analisa Sistem Kecepatan Motor Brushless DC dengan pengendali LQR-PD .....	IV-8
4.5	Analisa Kekokohan pengendali LQR-PD dengan memberikan Gangguan .....	IV-12

### BAB V PENUTUP

5.1	KESIMPULAN .....	V-1
5.2	SARAN .....	V-1

### DAFTAR PUSTAKA

#### LAMPIRAN A RANGKAIAN PENGENDALI PADA SIMULINK

#### LAMPIRAN B HASILAN SIMULASI TUNNING LQR

#### LAMPIRAN C HASIL SIMULASI TUNNING LQR-PD

#### BIOGRAFI

## DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar		
Gambar 2.1.	<i>Sensor hall dan encorder pada motor brushless DC</i>	II-3
Gambar 2.2.	Motor <i>brushless DC</i> sederhana	II-4
Gambar 2.3.	Rangkaian listrik sederhana	II-5
Gambar 2.4.	Diagram motor <i>brushless DC</i>	II-5
Gambar 2.5.	Diagram simetris motor <i>brushless DC</i>	II-9
Gambar 2.6.	Sistem kendali dengan skema optimal LQR	II-14
Gambar 2.7.	Diagram blok control proportional	II-15
Gambar 2.8.	Diagram blok control derevative	II-16
Gambar 2.9.	Respon waktu orde 2	II-17
Gambar 2.10.	Ikon Matlab	II-18
Gambar 2.11.	Tampilan <i>Model Simulink</i> pada Matlab	II-19
Gambar 2.12.	Kotak Dialog <i>Simulink Library</i>	II-20
Gambar 3.1.	Blok diagram motor <i>brushless DC</i> dengan <i>open loop</i>	III-4
Gambar 3.2.	Grafik keluaran motor <i>brushless DC</i> dengan <i>open loop</i>	III-5
Gambar 3.3.	Blok diagram motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR	III-10
Gambar 3.4.	Rangkaian motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR	III-10
Gambar 3.5.	Tampilan program M-file pengendali LQR	III-10
Gambar 3.6.	Blok diagram pengendali LQR-PD	III-10
Gambar 3.7.	Rangkaian pengendali LQR-PD	III-10
Gambar 3.8.	Rangkaian pengendali LQR-PD dengan gangguan	III-12
Gambar 4.1.	Rangkaian Motor <i>brushless DC</i> dengan <i>open loop</i>	IV-1
Gambar 4.2.	Grafik keluaran <i>brushless DC</i> dengan <i>open loop</i>	IV-2
Gambar 4.3.	Rangkaian motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR	IV-4
Gambar 4.4.	Respon keluaran motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR	IV-5
Gambar 4.5.	Rangkaian motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR-PD	IV-8
Gambar 4.6.	Respon keluaran motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR-PD	IV-8
Gambar 4.7.	Rangkaian motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR-PD dengan Gangguan	IV-11
Gambar 4.8.	Respon keluaran motor <i>brushless DC</i> menggunakan pengendali LQR-PD dengan Gangguan	IV-12

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1. Parameter motor <i>brushless</i> DC.....	II-10
Tabel 3.1. Matrik R konstan dengan analisa IAE.....	III-7
Tabel 3.2. Tabel penalaan Pengendali LQR-PD menggunakan metode Heuristic.....	III-11
Tabel 4.1. Respon waktu sistem secara <i>open loop</i> .....	IV-4
Tabel 4.2. Respon waktu sistem dengan menggunakan pengendali LQR.....	IV-7
Tabel 4.3. Respon waktu sistem dengan menggunakan pengendali LQR-PD .....	IV-11
Tabel 4.4. Perbandingan respon <i>output</i> antara pengendali LQR dengan LQR-PD.....	IV-11
Tabel 4.5. Hasil Analisa Sistem Motor <i>Brushless</i> DC Dengan Gangguan.....	IV-14



## DAFTAR RUMUS

Rumus	Halaman
Rumus 2.1. Prinsip Kerja <i>Brushless</i> DC .....	II-4
Rumus 2.2. Model Matematika Motor <i>Brushless</i> DC .....	II-5
Rumus 2.3. Pengendali LQR .....	II-11
Rumus 2.4. Pengendali P .....	II-15
Rumus 2.5. Pengendali D .....	II-15
Rumus 2.6. <i>Maximum Overshoot</i> .....	II-17

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DC

Kp

Kd

PB

td

tr

Matlab

Mp

BLDC

LQR

PMSM

## DAFTAR SINGKATAN

= *Direct Current*

= Konstanta *Proposional*

= Konstanta *Derivative*

= *Proposional Band*

= *Delay Time*

= *Rise Time*

= *Matrix Labaratory*

= *Maximum overshoot*

= *brushless direct current*

= *Linear Quadratic Regulator*

= *Permanent Magnet Synchronous motor*

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi saat ini sangat dibutuhkan manusia dalam membantu meningkatkan keselamatan kerja. Jenis - jenis teknologi yang dapat digunakan untuk membantu suatu pekerjaan di dunia industri diantaranya motor, generator, kompresor, dan boiler. Penggunaan motor di dunia industri adalah motor arus searah (DC) karena, motor DC merupakan jenis motor listrik yang pertama digunakan. Motor DC ini dapat ditemukan dalam industri produk dan layanan, makanan, robotika, dan alat-alat elektronika lainnya. Motor DC ini memiliki prinsip kerja dengan kecepatan tinggi yang dapat divariasikan, serta biaya perawatan yang rendah [1].

Motor DC memiliki banyak jenis yaitu motor servo, motor *brushless* DC, dan motor stepper. Jenis motor DC yang digunakan pada dunia industri yaitu motor *Brushless Direct Current* (BLDC) karena motor *brushless* DC memiliki suatu ketetapan yang bagus, tidak membutuhkan perawatan yang khusus, dan juga motor ini tidak memiliki sikat. Motor *brushless* DC memiliki berbagai macam tipe seperti motor *brushless* DC axial flux 3, motor *brushless* DC exterior rotor dan motor *brushless* DC mexom, pada setiap tipe pada motor *brushless* DC memiliki parameter yang berbeda - beda [2] [3]. Motor *brushless* DC sendiri sudah banyak digunakan di dunia industri seperti pada industri otomotif, industri kesehatan, dan instrumentasi [4]. Pada dunia industri yang menggunakan motor *brushless* DC diperlukannya pengaturan motor *brushless* DC agar dapat berjalan dengan optimal maka dibutuhkan suatu pengendali yang dapat mengatur keluaran *setpoint* yang diinginkan [5]. Dalam mengatasi permasalahan tersebut diperlukan sebuah perancangan sistem kendali motor *brushless* DC berjalan sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

Motor *brushless* DC merupakan jenis motor sinkron yang berarti medan magnet yang dihasilkan dari rotor maupun stator mempunyai frekuensi yang sama. Motor *brushless* DC memiliki keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, seperti respon dinamis yang tinggi, umur operasi yang lama, kecepatan torsi yang baik, efisiensi yang tinggi, dan perawatan yang rendah [6]. Konsep sistem motor *brushless* DC ini merujuk pada rangkaian elektromekanik. Bagian pada elektromekanik ini menonjolkan konsep keunggulan motor DC konvensional dalam hal pengendalian, dan keunggulan motor sinkron 3 *phasa* dalam hal



efisiensi. Pada bagian elektronika yang terdiri dari saklar dengan memanfaatkan komponen transistor dalam mengubah tegangan searah ke tegangan bolak balik (*inverter*) [4].

Pada motor *brushless* DC terdapat masalah parameter yang harus dikendalikan diantaranya kecepatan dan posisi. Dalam pengendalian kecepatan pada motor *brushless* DC dapat diatasi dengan memvariasikan tegangannya. Pada faktor luar seperti naik turunnya tegangan yang masuk terhadap kecepatan dan posisi bisa terganggu, sehingga perlunya suatu sistem kendali optimal yang mampu mengendalikan kecepatan dan posisi pada motor *brushless* DC. Kendali Optimal adalah sistem kendali yang memiliki daya tanggap yang cepat dan stabil, tetapi tidak memerlukan energi yang berlebihan [7].

Sistem kendali optimal adalah satu set persamaan diferensial yang menggambarkan jalan dari variabel-variabel kendali yang meminimalkan biaya fungsional. Secara umum pengendali optimal mempunyai 2 fungsi yaitu sebagai *regulator* (menstabilkan sistem dengan variabel/output agar tetap kecil) dan sebagai tracking (mengontrol sistem agar tetap mengikuti *trayektory* dan keadaannya selalu dalam batas batas tertentu). Kendali optimal dengan kriteria *Quadratic* dalam menyelesaikan masalah yang ada pada *regulator* yaitu kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) [8]. Pengendali LQR dipilih didasari adanya keunggulan bersifat *Regulator* yang terdapat pada LQR. *Regulator* sebagai pengendalian agar sistem tetap konstan dan dapat bertahan pada keadaan *setpoint* [9]. Pada pengendali LQR ini juga menggunakan IAE atau disebut *integral Absolute Error* untuk mengetahui seberapa besar error yang terjadi [10]. Pengendali LQR dengan menggunakan IAE diharapkan dapat menjaga kestabilan sistem motor *brushless* DC dari awal hingga akhir. Sehingga, masalah ada pada motor *brushless* DC dapat diatasi [11].

Beberapa penelitian dilakukan pada motor *brushless* DC dalam pengendalian kecepatan. Pada penelitian yang berjudul sistem pengaturan kecepatan motor *brushless* DC menggunakan pengendali linear quadratic regulator (LQR) [12]. Keluaran hasil respon pada sistem ini yaitu *time delay* 0.481 detik, *rise time* 2.043 detik, *selting time* 2.776 detik akan tetapi *error steady state* pada sistem ini masih besar yaitu 5.15%.

Penelitian yang berjudul desain kontroler *Fuzzy-PID* gain scheduling untuk pengaturan kecepatan motor DC tanpa sikat [13]. Keluaran hasil respon implementasi *output* dengan menggunakan kendali *Fuzzy-PID* masih tinggi pada nilai *rise time* 2.6 detik, *selting time* 3.6 detik dan masih adanya *overshoot* sebesar 1.28% serta terdapat osilasi pada sistem ini.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Penelitian yang berjudul rancang bangun pengendalian kecepatan *brushless* DC motor tipe A2212/10T 1400 KV menggunakan kontroler PID berbasis labview [14]. Keluaran respon sistem menghasilkan nilai *rise time* 1.089 detik, *selting time* 1.48 detik, *time delay* 0.256 detik dan adanya *error steady state* sebesar 4.3%.

Penelitian selanjutnya berjudul perancangan dan implementasi kecepatan motor *brushless* DC menggunakan metode *Model Predictive Control* (MPC) [15]. Pada penelitian ini menghasilkan keluaran yaitu pada nilai *overshoot* 0% pada beban maksimal. *Respon time* sistem dari MPC untuk keluaran nilai *rise time* 0.94 detik, nilai *selting time* 0.98 detik, dan *error steady state* sebesar 12%. Disini terlibat bahwa mpc memiliki kelemahan terhadap nilai *error steady state* yang begitu besar.

Penelitian selanjutnya meneliti tentang sistem kendali kecepatan motor *brushless* DC menggunakan metode algoritma *hybrid* PID - *Fuzzy* [16]. Pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem kendali dengan menggunakan parameter PID - logika *fuzzy* untuk mengatur kecepatan motor *brushless* DC dapat membantu dalam memperbaiki kinerja dari PID konvensional. Pengujian untuk mencapai *set point* dan perubahan beban, dihasilkan nilai rata-rata dari kendali PID konvensional yaitu *selting time* 0.025 detik, *overshoot* 15.98%, sedangkan kendali *hybrid* Fuzzy-PID dengan nilai *rise time* 0.0025 detik, *selting time* 0.057 detik dan *overshoot* sebesar 5.42% .

Pada penelitian yang menggunakan pengendali LQR menunjukkan masih adanya *error steady state* [12]. Oleh karena itu, untuk menghilangkan *error steady state* yang ada pada kendali LQR dibutuhkannya pengendali konvensional yang mampu menutupi kekurangan pada kendali LQR tersebut. Pengendali konvensional yang dipilih yaitu PID. Pengendali PID mempunyai 3 komponen aksi utama yaitu *Proporsional*, *Integral*, dan *Derivative*, masing-masing aksi kendali ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kendali proporsional mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, aksi kendali integral mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error*, dan aksi kendali *derivative* mempunyai keunggulan untuk memperkecil *overshoot* [17]. sehingga kendali PID sangat cocok dipilih dalam membantu menghilangkan *error steady state* pada kendali LQR.

Beberapa penelitian yang sudah dilakukan menggunakan pengendali LQR dengan plant yang berbeda. Penelitian tentang pengendali LQR untuk mengendalikan kecepatan motor induksi 3 *phasa*. Motor induksi 3 *Phasa* ini menghasilkan respon sistem dengan nilai



selting time 5.69 detik dan masih terdapat osilasi. Maka dilakukan kombinasi antara LQR dan PID menghasilkan respon sistem dengan nilai *selting time* 0.33 detik dan *rise time* 0.219 detik tanpa beban dan tidak adanya *overshoot* maupun *error steady state* pada sistem ini [18]. Pada hasil keluaran sistem menggunakan kendali LQR dan PID dapat menstabilkan keluaran seperti tidak adanya *overshoot* maupun osilasi yang terjadi pada sistem motor 3 phase.

Berdasarkan pada penelitian yang dirujuk dengan menggunakan pengendali LQR-PID dalam pengendalian kecepatan motor 3 fasa tidak adanya *overshoot* maupun *error steady state* [18]. Pada pengendali LQR dalam mengendalikan motor *brushless* DC masih adanya *error steady state*. Pemilihan pengendali PD dengan kombinasi LQR dalam membantu menghilangkan *error steady state* yang ada dan mempercepat waktu *respon transient*. Alasan tidak menggunakan PI karena fungsi dari *integral*(I) meredam error yang besar [7]. *Error steady state* yang terjadi pada pengendali LQR tidak begitu besar sehingga dipilihnya PD karena *derevatif* (D) dapat menghilangkan *overshoot* yang di hasilkan *propotional* (P) dalam mempercepat waktu *respons transient*.

Berdasarkan studi literatur yang telah di lakukan. Penulis akan mengkombinasikan pengendali LQR-PD agar dapat mengurangi *error steady state* dan mempercepat waktu *respons transient* pada sistem motor *brushless* DC. Maka penulis akan mengajukan judul Tugas Akhir yaitu “**PERANCANGAN KENDALI HYBRID LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)-PD PADA KECEPATAN MOTOR BURSHLESS DC**”

## 1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

- a. Bagaimana pengaruh PD pada pengendali LQR?
- b. Bagaimana performansi pengendali LQR setelah ditambahkan PD dalam mengatasi *error steady state* pada sistem motor *brushless* DC?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Merancang pengendali LQR yang ditambahkan dengan PD
- b. Mengetahui hasil performansi Ketika ditambahkan pengendali PD pada LQR dalam mengatasi *error steady state* pada sistem motor *brushless* DC



Mengetahui hasil performasi LQR-PD mengatasi *error steady state* saat pemberian gangguan pada sistem motor *brushless* DC

#### 1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membuat batasan masalah sebagai berikut :

- 1. Pemodelan sistem motor *brushless* DC yang di gunakan adalah maxom EC 45 flat Ø 45 mm
- 2. Tidak membahas perangkat keras motor *brushless* DC
- 3. Aplikasi yang digunakan untuk simulasi menggunakan MATLAB

#### 1.5. Manfaat Penelitian

- 1. Menghasilkan rancangan sistem kendali yang baik untuk mengendalikan kecepatan pada motor *brushless* DC.
- 2. Dapat dijadikan sebagai referensi untuk pengaplikasian pada industri dan memberikan kemudahan dalam penyelesaian permasalahan yang terjadi pada proses pengendalian kecepatan motor *brushless* DC.
- 3. Dapat dijadikan sebagai referensi penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terkait

Pada penelitian Tugas akhir perlu dilakukannya studi literatur dalam mencari teori-teori dan referensi yang relevan dengan permasalahan dan kasus yang akan diselesaikan. Teori dan referensi ini didapatkan melalui buku, paper, jurnal dan sumber lainnya.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan pada motor *brushless* DC dalam pengendalian kecepatan. Pada penelitian yang berjudul sistem pengaturan kecepatan motor *brushless* DC menggunakan pengendali linear quadratic regulator (LQR) [12]. Keluaran hasil respon pada sistem ini yaitu *time delay* 0.481 detik, *rise time* 2.043 detik, *settling time* 2.776 detik akan tetapi, *error steady state* pada sistem ini masih besar yaitu 5.15%. pada sistem perlunya penambahan pengendali PID untuk menurunkan *error steady state* pada sistem motor *brushless* DC.

Penelitian yang berjudul desain kontroler *Fuzzy*-PID gain scheduling untuk pengaturan kecepatan motor DC tanpa sikat [13]. Keluaran hasil respon implementasi *output* dengan menggunakan kendali *Fuzzy*-PID masih tinggi pada nilai *rise time* 2.6 detik, *settling time* 3.6 detik, dan masih adanya *overshoot* sebesar 1.28% serta terdapat osilasi pada sistem ini. Penelitian yang berjudul rancang bangun pengendalian kecepatan *brushless* DC motor tipe A220/10T 1400 KV menggunakan kontroler PID berbasis labview [14]. Keluaran respon sistem menghasilkan nilai *rise time* 1.089 detik, *settling time* 1.48 detik, *time delay* 0.256 detik dan adanya *error steady state* sebesar 4.3%.

Penelitian selanjutnya berjudul perancangan dan implementasi kecepatan motor *brushless* DC menggunakan metode *Model Predictive Control* (MPC) [15]. Pada penelitian ini menghasilkan keluaran yaitu pada nilai *overshoot* 0% pada beban maksimal. *Respon time* sistem dari MPC untuk keluaran nilai *rise time* 0.94 detik, nilai *settling time* 0.98 detik, dan *error steady state* sebesar 12%. Disini terlibat bahwa mpc memiliki kelemahan terhadap nilai *error steady state* yang besar.

Penelitian selanjutnya meneliti tentang sistem kendali kecepatan motor *brushless* DC menggunakan metode algoritma *hybrid* PID - *Fuzzy* [16]. Pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem kendali dengan menggunakan parameter PID - logika *fuzzy* untuk mengatur kecepatan motor *brushless* DC dapat membantu dalam memperbaiki kinerja dari

PID konvensional. Pengujian untuk mencapai *setpoint* dan perubahan beban, dihasilkan nilai rata-rata dari kendali PID konvensional yaitu *selting time* 0.025 detik, overshoot 15.98%, sedangkan kendali hybrid Fuzzy-PID dengan nilai *rise time* 0.0025 detik, *selting time* 0.057 detik dan overshoot sebesar 5.42% .

Beberapa penelitian yang sudah menggunakan pengendali LQR dengan plant yang berbeda. Penelitian tentang pengendali LQR untuk mengendalikan kecepatan motor induksi 3 phasa. Motor induksi 3 Phasa ini menghasilkan respon sistem dengan nilai *selting time* 5.69 detik dan masih terdapat osilasi. Maka dilakukan kombinasi antara LQR dan PID mendapatkan menghasilkan keluaran sistem dengan nilai *selting time* 0.33 detik dan *rise time* 0.219 detik tanpa beban dan tidak adanya overshoot maupun *error steady state* pada sistem ini [18]. Pada hasil keluaran sistem menggunakan kendali LQR dan PID dapat menstabilkan keluaran seperti tidak adanya overshoot maupun osilasi yang terjadi pada sistem motor 3 phasa.

Berdasarkan pada hasil dari penelitian diatas yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan beberapa pengendali telah digunakan pada sistem ini. Hasil keluaran yang diperoleh dari beberapa pengendali sudah baik walaupun masih ada yang belum berhasil menghilangkan *error steady state*. Tapi alangkah sebaiknya kalau pengendali yang dipakai selain menghilangkan *error steady state*, juga bisa menjaga performa sistem agar tahan dari gangguan. Oleh karena itu penulis mengusulkan melakukan penelitian tentang analisis identifikasi sistem pada motor *brushless* DC dengan menggunakan pengendali LQR-PD untuk mengendalikan kecepatan.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Motor Brushless DC

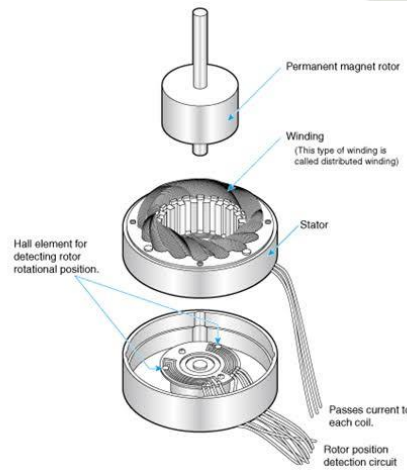
Motor *brushless* DC adalah *Permanent Magnet synchronous* motor (PMSM) yang merupakan kontruksi dari motor listrik *synchronous* AC 3 phasa. Medan magnet yang diaktifkan oleh stator dan rotor yang berputar pada frekuensi yang sama disebut dengan *Synchronous*. Pada motor *brushless* DC memiliki BEMF berbentuk *trapezoidal*, sedangkan PMSM memiliki BEMF berbentuk *sinusoidal* walaupun demikian bentuk keduanya memiliki struktur yang sama [19]. Dibandingkan dengan motor DC, motor *brushless* DC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan tinggi akibat tidak menggunakan *brush*. Perbandingan efesiensi antara motor *brushless* DC dengan motor induksi, motor *brushless* DC memiliki efesiensi yang lebih tinggi karena torsi awal motor *brushless* DC





### 2.2.2.2 Konstruksi Motor Brushless DC

pada motor *brushless* DC memiliki 2 bagian yaitu stator dan rotor. Rotor adalah komponen yang bergerak, rotor ini terbuat dari magnet permanen. Stator adalah komponen yang tidak bergerak, stator ini terbuat dari kumparan 3 *phasa*. Pada gambar di bawah menunjukkan struktur motor *brushless* DC yang terdiri dari magnet permanen, gulungan stator yang sama pada motor *polyphase* AC, dan sensor *hall*. [21]



Gambar 2.2 motor *brushless* dc sederhana [21]

### 2.2.3 Prinsip Kerja Motor Brushless DC

Motor *brushless* DC dapat bekerja ketika stator diberikan arus 3 *phasa*. Arus yang mengalir melewati kumparan akan menimbulkan medan magnet (B) [7]:

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (2.1)$$

Dimana :

N = jumlah lilitan

I = arus

l = panjang lilitan dan

$\mu$  = permeabilitas bahan

Arus yang mengalir pada stator berupa arus AC 3 *phasa sinusoidal*, maka nilai polaritas dan medan setiap *coil* (kumparan) akan berubah setiap waktu. Akibatnya akan menimbulkan pergantian polaritas serta besarnya medan magnet setiap *coil* sehingga terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan [7] :

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Diarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

(2.2)

Dimana :

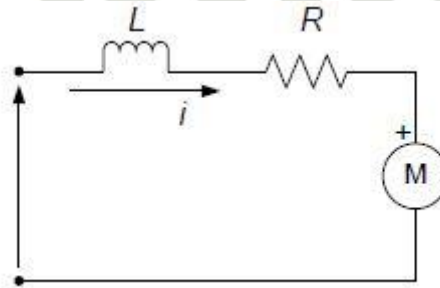
$n_s$  = kecepatan sinkron

$f$  = frekuensi arus input

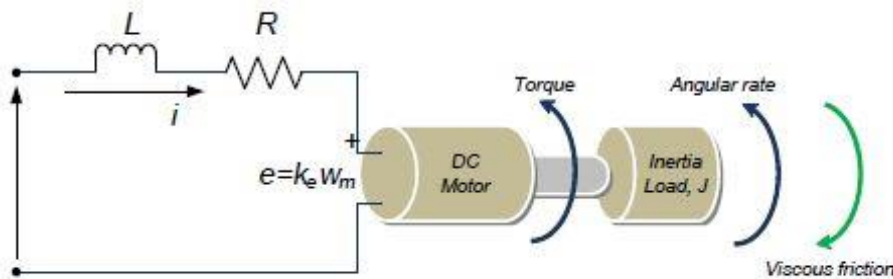
$p$  = jumlah *pole* rotor

### 2.2.4 Model Matematika Motor Brushless DC

Pemodelan matematika motor brushless DC tidak berbeda dari motor DC konvensional. Untuk pemodelan motor DC dapat dilihat pada gambar [7]



Gambar 2.3 rangkaian listrik sederhana



Gambar 2.4 diagram motor DC

Dari gambar diatas dapat dibuat persamaan menggunakan hokum kirchoff, persamaan sebagai berikut :

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e$$

(2.3)

Oleh karena itu, untuk keadaan tidak tunak, persamaan 2.3 diatur ulang untuk membuat ketentuan emf dari motor DC, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan dibawah ini [7] :

$$e = Ri - L \frac{di}{dt} + V_s$$

(2.4)

Dimana :



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$V_s$  = tegangan motor DC

$i$  = arus rotor

mengingat sifat mekanik motor DC, tentang hukum kedua dari newton tentang gerak, sifat mekanik *relative* terhadap torsi pengaturan sistem pada persamaan 2.3 dan 2.4 akan menjadi hasil dari beban inersia,  $J$  adalah rotor inersia dan  $\omega_m$  adalah kecepatan sudut, dapat dilihat dari persamaan berikut [7] :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum T_i \quad (2.5)$$

$$T_e = K_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (2.6)$$

Dimana :

$T_e$  = torsi listrik

$K_f$  = gesekan konstan

$\omega_m$  = kecepatan sudut

$J$  = rotor inersia

$T_L$  = beban mekanik

Dimana torsi listrik dan emf dapat di tulis dengan :

$$e = k_e \omega_m \quad (2.7)$$

$$T_e = k_t \omega_m \quad (2.8)$$

Dimana :

$k_e$  = emf konstan

$K_t$  = torsi kosntan

Maka persamaan (2.4) dan (2.6) dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{di}{dt} = i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.9)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.10)$$

Menggunakan transformasi laplace untuk mengevaluasi persamaan (2.9) dan (2.10) dapat ditulis sebagai berikut (semua kondisi dalam keadaa nol) [7] :

Untuk persamaan (2.9) :

$$\mathcal{L} \left\{ \frac{di}{dt} \right\} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.11)$$

Menjadi:

$$si = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.12)$$

Untuk persamaan (2.10) :

$$\mathcal{L} \left\{ \frac{d\omega_m}{dt} \right\} = -i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.13)$$

Menjadi:

$$s\omega_m = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.14)$$

Tanpa beban (untuk  $T_L = 0$ ) dari persamaan menjadi :

$$s\omega_m = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m \quad (2.15)$$

Dari persaman (2.15),  $i$  pada persamaan (2.12) dapat digantikan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$i = \frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \quad (2.16)$$

$$\left( \frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \right) \left( s + \frac{R}{L} \right) = -\frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.17)$$

Persamaan (2.16) menjadi :

$$\left\{ \left( \frac{s^2 J}{k_t} + \frac{sk_f}{k_t} + \frac{sRJ}{k_t L} + \frac{k_f R}{k_t L} \right) + \frac{k_e}{L} \right\} \omega_m = \frac{1}{L} V_s \quad (2.18)$$

Dan persamaan (2.18) di sederhanakan pada persamaan (2.19) :

$$V_s = \left( \frac{s^2 J L + sk_f L + sRJ + k_f R + k_e k_t}{k_t} \right) \omega_m \quad (2.19)$$

Maka, *transfer function* dapat dicari dengan menggunakan *ratio* dan kecepatan sudut,  $\omega_m$  ke sumber tegangan  $V_s$  adalah [7]:

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\frac{\omega_m}{v_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + s k_f L + s R J + k_f R + k_e k_t} \quad (2.19)$$

Fungsi alih tersebut di turunkan lagi menjadi :

$$\frac{\omega_m}{v_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + (R J + k_e L) + k_f R + k_e k_t} \quad (2.20)$$

Mengingat asumsi sebagai berikut

1. Gesekan konstan kecil yaitu  $k_f$  cenderung 0, ini berarti;
2.  $R J \gg k_f L$
3.  $k_e k_t \gg R k_f$

Setelah mangabaikan nilai-nilai tersebut, fungsi alih dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\omega_m}{v_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + R J s + k_e k_t} \quad (2.21)$$

Jadi, dengan pengaturan ulang manipulasi matematika pada  $J L$  dengan mengalihkan atas dan bawah di persamaan (2.21) [7]

$$\begin{aligned} & \frac{R}{k_e k_t} \times \frac{1}{R} \\ & \frac{R}{k_e k_t} \times \frac{1}{R} \\ & \frac{R}{k_e k_t} \times \frac{1}{R} \end{aligned}$$

Maka diperoleh persamaan setelah manipulasi sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{\frac{k_t R}{k_e k_t R}}{\frac{R J}{k_e k_t R} \cdot \frac{L}{R} s^2 + \frac{R J R}{k_e k_t R} s + \frac{k_e k_t R}{k_e k_t R}} = \frac{\frac{1}{k_e}}{\frac{R J}{k_e k_t R} \cdot \frac{L}{R} s^2 + \frac{R J}{k_e k_t} s + 1} \quad (2.22)$$

Dari persamaan (2.22) konstanta berikut didapatkan

Mekanik (waktu konstan):

$$\tau_m = \frac{R J}{k_e k_t} \quad (2.23)$$



## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Listrik (waktu konstan);

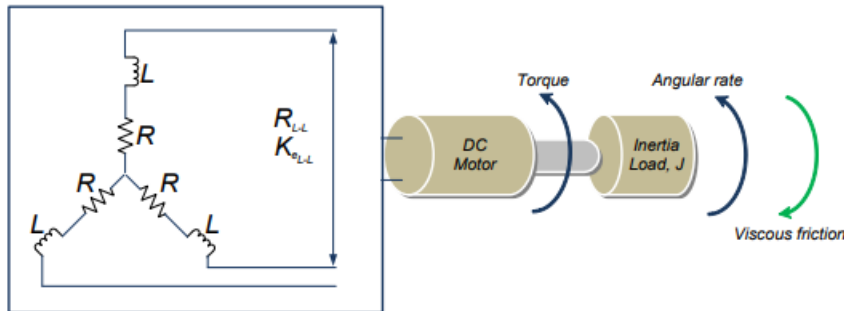
$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2.24)$$

Mensubstitusi persamaan (2.22) kedalam persamaan :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (2.25)$$

Pada pemodelan motor *brushless* DC tidak jauh berbeda dari motor DC. Hal yang membedakan pemodelan yang terletak pada *fase* yang mempengaruhi hasil keseluruhan model *brushless* DC. *Fase* khusus yang mempengaruhi resistif dan induktif dari susunan *brushless* DC. Contohnya pada pengaturan sederhana dengan simetris 3 *fase* dan ini koneksi interal yang bias memberikan gambaran singkat tentang konsep *fase* keseluruhan [7].

Disini akan menampilkan perbedaan persamaan dari motor DC konvensional. Perbedaan ini akan mempengaruhi konstanta mekanik dan listrik karena motor merupakan bagian yang sangat penting dari parameter pemodelan [7].



Gambar 2.5 diagram simetris *Brushless* DC [7]

Untuk ketetapan *mechanical time constant* dengan peraturan sistematis, persamaan (2.23) menjadi [7] :

$$\tau_m = \sum \frac{RJ}{k_e k_t} = \frac{J \sum R}{k_e k_t} \quad (2.26)$$

*Electrical time constant*

$$\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\sum R} \quad (2.27)$$

Oleh karena itu adanya susunan sistematis dan *fase* ke-3, *mechanical* dan *electrical constant* diketahui menjadi [7] :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Mechanical constant,

$$\tau_m = \frac{J \cdot 3R}{k_e k_t} \quad (2.28)$$

Electrical constant,

$$\tau_e = \frac{L}{3 \cdot R} \quad (2.29)$$

Efek *phasa*,

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R J}{\left( \frac{k_e (L-L)}{\sqrt{3}} \right) \cdot k_t} \quad (2.30)$$

Sehingga persamaan (2.30) dirubah menjadi

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R \cdot J}{k_e k_t} \quad (2.31)$$

Dimana  $k_e$  merupakan nilai dari *fase* emf tegangan konstan :

$$k_e = \frac{k_e (L-L)}{\sqrt{3}} \quad (2.32)$$

Lalu terdapat hubungan antara  $k_e$  dan  $k_t$  yaitu menggunakan tenaga elektrik (sisi kiri) dan tenaga mekanik (sisi kanan) maka [7]:

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \times E \times I &= \frac{2\pi}{60} \times N \times T \\ \frac{E}{N} &= \frac{T}{I} \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{3}} \\ k_e &= k_t \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{30}} \\ k_e &= k_t \times 0.0605 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dimana :

$E$  = percepatan (v/secs)

$N$  = putaran (rad)

$T$  = medan magnet (Nm)

$I$  = arus listrik (A)

$$k_e = \left[ \frac{V-secs}{rad} \right] ; \text{ torsi elektrik} \quad (2.34)$$

$$k_t = \left[ \frac{N-m}{A} \right]; \text{ torsi konstan} \quad (2.35)$$

Kemudian, adapun persamaan untuk motor *brushless* DC dapat diperoleh dari persamaan (2.25) dengan mempertimbangkan efek dari konstanta dan fase yang sesuai [7] :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (2.36)$$

Tabel 2.1 parameter motor *brushless* DC [7]

Parameter motor <i>brushless</i> DC	Value	Unit
<i>Terminal resistance phase to phase</i> (R)	1.20	$\Omega$
<i>Terminal resistance phase to phase</i> (L)	0.0560	mH
Putaran konstan ( $k_t$ )	25.5	mNm/A
Kecepatan konstan ( $k_s$ )	37.4	Rpm/V
Gradasi kecepatan/putaran ( $k_\theta$ )	17.6	Rpm/mNm
<i>Mechanical time constant</i> ( $\tau_m$ )	17.1	Ms
Rotor inersia (J)	92.5	$gcm^2$
<i>Number of phasa</i>	3	

## 2.3 Linear Quadratic Regulator (LQR)

Pokok bahasan dalam kendali optimal adalah menentukan sinyal kendali yang akan di proses untuk memenuhi batasan fisik sesuai dengan kriteria performansi yang diinginkan. Kendali optimal dengan kriteria *Quadratic* dalam menyelesaikan masalah *regulator* yaitu kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) [8]. Perancangan model dan bentuk kendalinya berupa garis lurus disebut dengan *linear*, sedangkan *Quadratic* memiliki *cost function* berupa kuadrat, dan disebut *regulator* karena referensi sistem bukan fungsi waktu. Dari hasil linierisasi didapatkan suatu *plant linear* dalam bentuk :

$$\dot{x} = A_x + B_u \quad (2.37)$$

$$y = Cx$$





### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

$$\dot{\lambda} = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial x}{\partial x} \right)^{\tau} Qx + \left( \frac{\partial Qx}{\partial \lambda} \right)^{\tau} x + \left( \frac{\partial x}{\partial x} \right)^{\tau} Ru + \left( \frac{\partial Ru}{\partial x} \right)^{\tau} u \right] + \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \lambda} \right)^{\tau} (A_x + B_u) + \left( \frac{\partial (A_x + B_u)}{\partial x} \right)^{\tau} \lambda$$

$$\dot{\lambda} = Qx + A^{\tau} \lambda \quad (2.41)$$

Kondisi *stationer*

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$\left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial x}{\partial x} \right)^{\tau} Qx + \left( \frac{\partial Qx}{\partial x} \right)^{\tau} x + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{\tau} Ru + \left( \frac{\partial Ru}{\partial x} \right)^{\tau} u \right] + \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^{\tau} (A_x + B_u) + \left( \frac{\partial (A_x + B_u)}{\partial x} \right)^{\tau} \lambda = 0$$

$$Ru + B^{\tau} \lambda = 0$$

$$u = -R^{-1} + B^{\tau} \lambda \quad (2.42)$$

2. Syarat batas

a) Batas awal

$$t = 0 \quad x(0) = 0$$

b) Batas akhir

$$(\phi_x + \psi_x^{\tau} v - \lambda)^{\tau} dx|_{t=\tau} + (\phi_t + \psi_t^{\tau} v - H) dt|_{t=\tau} = 0 \quad (2.43)$$

Karena  $\psi = 0$  dan

$$\phi(T) = \frac{1}{2} x^{\tau}(T) s(T) x(T)$$

$$\phi_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = s(T) x(T) \quad (2.44)$$

Sehingga diperoleh persamaan

$$(s(T) x(T) + v \cdot 0 - \lambda)^{\tau} dt|_{t=\tau} = 0$$

$$s(T) x(T) = \lambda(t) \quad (2.45)$$

Dari persamaan *costrate* dan (2.45), keduanya menggunakan variabel  $\lambda$ . Pada saat keduanya didistribusikan, maka akan menghasilkan persamaan [8]:

$$s(T) x(T) = \lambda(t)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{s}(t) x(t) + S(t) \dot{x}(t)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -Qx - A^{\tau} \lambda$$

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\dot{S}(t)x(t) + S(t)\dot{x}(t) = -Qx - A^T\lambda$$

$$\dot{S}(t)x(t) + S(t)\{Ax + Bu\} = -Qx - A^T\lambda$$

$$\dot{S}(t)x(t) + S(t)\{Ax + B(-R^{-1}B^T\lambda)\} = -Qx - A^T\lambda$$

$$\dot{S}x = (A^TS + SA - SBR^{-1}B^TS + Q)x$$

$$\dot{S} = A^TS + SA - SBR^{-1}B^TS + Q \quad (2.46)$$

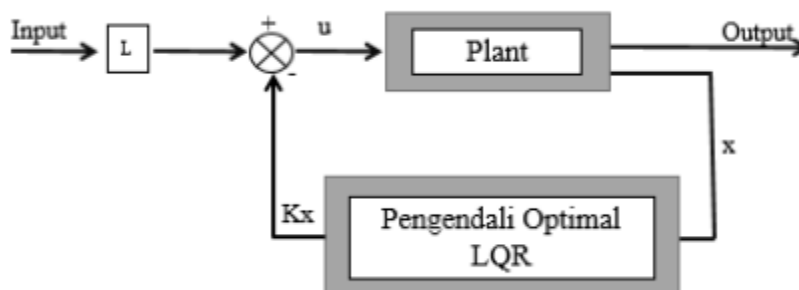
Persamaan (2.46) disebut dengan persamaan *diferensial Riccati*. Dimana untuk  $\dot{S} = 0$  persamaannya disebut dengan *Algebraic Riccati Equation* (ARE) [8]. Dengan di dapatkannya matriks S dari Persamaan ARE ini sehingga didapatkan persamaan sinyal kendali yang dapat dihitung :

$$u = -R^{-1}B^T\lambda = -R^{-1}B^TSx = -Kx \quad (2.46)$$

Maka konstanta umpan balik keadaan K dapat dicari sebelum menghasilkan sinyal kendali pada persamaan (2.47) :

$$k = R^{-1}B^TS \quad (2.47)$$

Karena nilai S adalah unik, maka solusi semi definit *positif* untuk persamaan ARE haruslah memenuhi syarat persamaan (2.46). Dalam perancangan kendali optimal LQR dengan mengetahui nilai S, lalu nilai S tersebut disubstitusikan ke persamaan (2.47) sehingga didapatkan nilai matriks optimal K, dengan K adalah *Gain State Feedback*, sehingga sistem kendali optimal LQR hasil desain dapat diperlihatkan pada gambar [8]



Gambar 2.6 Sistem Kendali dengan Skema Kendali Optimal LQR [23]



#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Dari penjabaran di atas dapat disimpulkan bahwa langkah-langkah untuk merancang kendali LQR adalah sebagai berikut :

1. Ubah bentuk *Transfer Fungtion Plant nonlinier* menjadi bentuk *State Space* dan dapatkan matriks A, B, C dan D dari *Plant* tersebut.
2. Tentukan matriks pembobol Q dan R
3. Selesaikan persamaan *aljabar riccati* hingga menghasilkan suatu matriks S yang *definit positif*
4. Hitung optimal *Gain Feedback K*

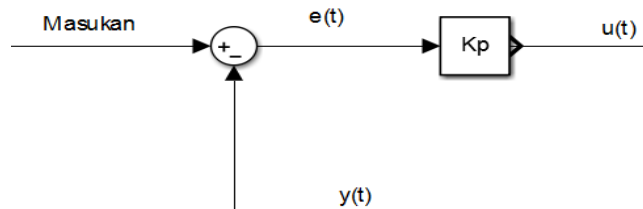
## 2.4 Pengendalian sistem

### 2.4.1 Pengendalian Proportional (P)

Kendali Proportional berfungsi untuk memperkuat sinyal kesalahan penggerak (sinyal *error*), sehingga akan mempercepat keluaran sistem mencapai titik referensi [24]. Hubungkan antara *input kontroler*  $u(t)$  dengan sinyal *error*  $e(t)$  terlihat pada persamaan dibawah :

$$u(t) = K_p e(t)$$

$K_p$  adalah konstanta proportional. Diagram blok kontrol proporsional ditunjukkan pada gambar dibawah :



Gambar 2.7 Diagram blok kontrol proportional [24]

Efek yang ditimbulkan oleh pengendali *proporsional* saat diaplikasikan pada sistem adalah sebagai berikut :

1. Menambah atau mengurangi kestabilan, ditandai adanya *overshoot*.
2. Memperbaiki *respon transient*, terutama *rise time* dan *settling time*.
3. Mengurangi *error steady state*, untuk mengurangi  $E_{ss}$  dibutuhkan nilai  $K_p$  yang besar tetapi membuat sistem menjadi tidak stabil. Kendali proportional memiliki nilai yang sebanding dengan *error*, dimana semakin besar nilai *error* maka semakin besar nilai sinyal kendali yang dihasilkan

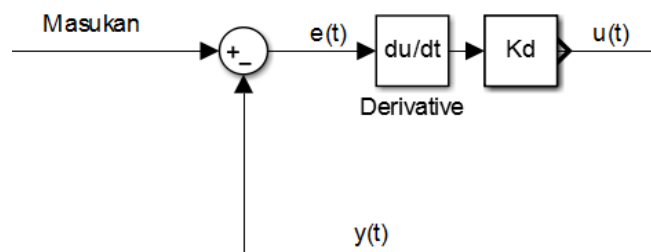
Kendali *proportional* dapat menghasilkan *offset* pada sistem. Dimana *offset* pada sistem dapat dilakukan dengan memperbesar nilai *proportional* atau  $K_p$ . Namun nilai  $K_p$  yang terlalu besar akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan timbulnya *osilasi* pada sistem. Kendali P dapat berdiri sendiri untuk pengendalian sistem.

#### 2.4.2 Pengendalian Dervative (D)

Kendali dervatif disebut pengendali laju, dikarenakan keluaran kendali setara dengan laju perubahan sinyal *error* [24]. Hubungan antara *output* kendali dervatrif  $u(t)$  dengan sinyal *error*  $e(t)$  terlihat pada persamaan dibawah :

$$u(t) = K_d \frac{du}{dt} e(t)$$

Blok kendali dervatif ditunjukkan pada gambar 2.8 kendali dervatif tidak bisa digunakan sendirian, karena kendali ini hanya aktif pada periode peralihan. Pada periode peralihan, kontrol dervatif menyebabkan adanya redaman pada sistem sehingga lebih memperkecil lonjakan. Seperti pengendali proporsional, pengendali dervatif tidak dapat menghilangkan *offset*.



Gambar 2.8 Diagram blok kontrol dervative [24]

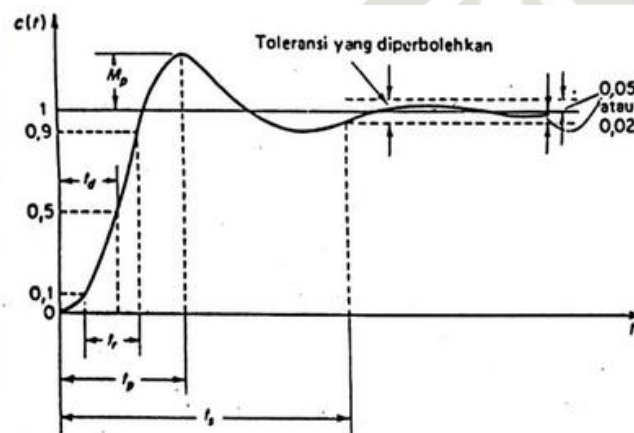
Pengaruh kendali dervatif terhadap sistem :

1. Kecepatan respon lebih tinggi
2. Sangat *sensitive* terhadap *nois* dan gangguan frekuensi tinggi
3. Kendali *dervatif* hanya berubah saat ada perubahan *error*, sehingga saat ada *error* statis D tidak beraksi. Sehingga D tidak boleh digunakan
4. Besarnya sinyal kendali sebanding dengan perubahan *error*. Semakin cepat *error* berubah maka, semakin besar aksi kendali yang ditimbulkan
5. Mengurangi *overshoot* dan waktu turun

Kesalahan keadaan tunak tidak mengalami perubahan yang berarti

## 2.5 Identifikasi Sistem

Perubahan perilaku output terhadap perubahan sinyal input disebut dengan Respon sistem. Bentuk Respon sistem ini berupa kurva yang menjadi dasar untuk menganalisa dari karakteristik sistem menggunakan persamaan atau model matematis. Bentuk kurva respon sistem ini dapat dilihat setelah mendapatkan sinyal input. Sinyal input yang diberikan untuk mengetahui karakteristik sistem disebut dengan sinyal test [25].



Gambar 2.9 Respon waktu orde 2

### a. Waktu tunda (*delay time*)

Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.

### b. Waktu naik (*rise time*)

Waktu naik adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% sampai 100% dari harga akhir

### c. Waktu puncak

Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewat yang pertama kali

### d. Maximum Overshoot ( $M_p$ )

Maximum overshoot adalah harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewat maksimum. Parameter ini didefinisikan sebagai berikut :

$$\% \text{ maximum Overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

### e. Waktu penetapan (*settling time*)



*Settling time* adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetapkan dalam daerah sekitar harga akhir yang ukurannya dengan persentase mutlak dari harga akhir (5% atau 2%)

## 2.6 Kriteria Integral Menggunakan Integral Of Absolute Error (IAE)

Kriteria integral membutuhkan data tanggapan mulai dari  $t = 0$  hingga mencapai keadaan tunak. Kriteria ini didasarkan pada seluruh tanggapan dari proses yang bersangkutan. Kriteria integral yang digunakan pada penelitian ini adalah kriteria IAE (*integral Absolute Error*) yang bertujuan untuk mendapatkan nilai IAE sekecil mungkin dengan pemilihan kriteria tergantung pada karakteristik sistem proses dan beberapa syarat tambahan yang diperoleh dari tanggapan close loop. Kriteria IAE lebih populer dikalangan praktisi industri sebab mudah dalam pemakaiannya serta sangat cocok untuk menekan error [10].

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt$$

## 2.7 Metode Heuristik

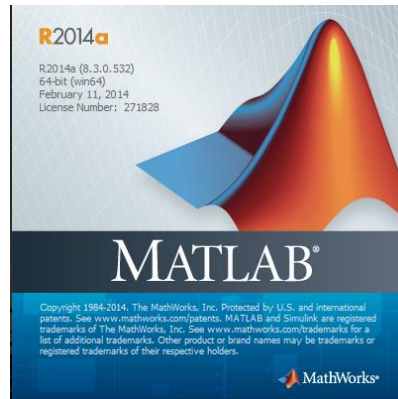
Sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba. Heuristik adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode heuristik ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja plant yang akan dikendalikan. Untuk perancangan sistem pengendalian PD dilakukan pencarian nilai besar  $K_p$  dan  $T_d$ . Maka pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, dengan penalaan (metode heuristik) dimana penalaan parameter pengendali dimulai dengan hanya menggunakan pengendali P kemudian baru ditambahkan pengendali D. Pemberian nilai ini di sesuaikan dengan karakteristik respon sistem yang diperoleh [26].

## 2.8 Matlab (Matrix Laboratory)

MATLAB (Matrix Laboratory) adalah suatu program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks [27].

### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.10 Ikon Matlab

MATLAB merupakan merk software yang dikembangkan oleh Mathworks.Inc dimana, dalam software ini menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks dan sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dan lain-lain. Sehingga Matlab banyak digunakan pada Matematika dan Komputansi, Pengembangan dan Algoritma, Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototype, Analisa Data , Eksplorasi dan visualisasi, Analisis numerik dan statistic, dan Pengembangan aplikasi teknik [27].

Pada perangkat lunak Matlab terdapat beberapa bagian penting yang digunakan dalam menjalankan program, yaitu :

1. *Command window* digunakan untuk mengetik fungsi yang diinginkan.
2. *Current Directory* berfungsi untuk menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan matlab
3. *Command history* berfungsi yang telah digunakan sebelumnya dapat kembali.
4. *Workspace* digunakan untuk membuat variabel yang ada dalam Matlab.

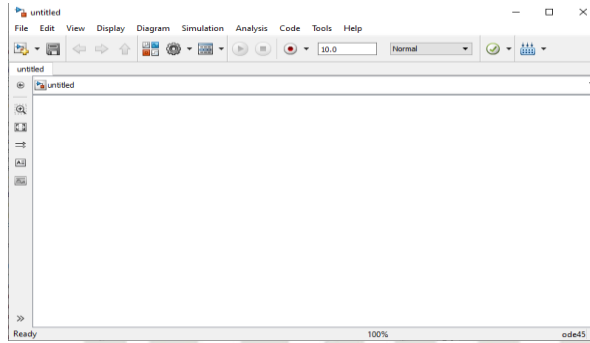
Pada penelitian ini dilakukan pemrograman modeling dan simulasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang diinginkan. fitur matlab yang digunakan untuk simulasi ini disebut *Simulink*.

*Simulink* adalah salah satu bagian dari Matlab program dimana *simulink* dapat digunakan untuk mensimulasi sistem, dalam artian mengamati dan menganalisa perilaku dari sebuah tiruan sistem yang sudah di modelkan. Tiruan sistem diharapkan memiliki perilaku yang sangat mirip dengan sistem fisik. Jika digunakan dengan benar, simulasi akan membantu proses analisis dan desain sistem.

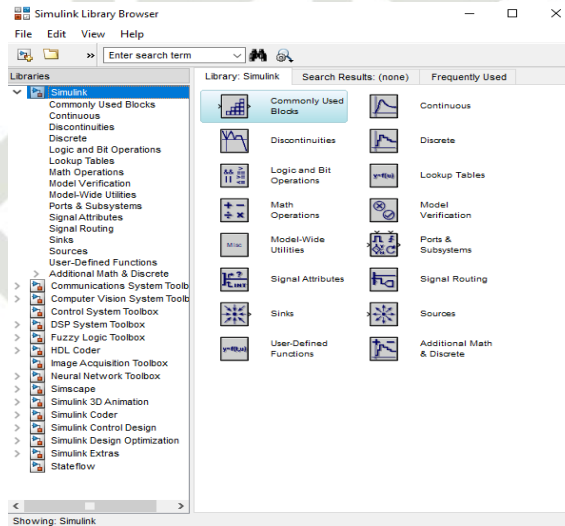
### Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

*Simulink* dalam aplikasi Matlab juga dapat menunjukkan performansi sistem dalam bentuk dua ataupun tiga dimensi. Dalam perancangan *user* menjadi mudah karena adanya blok-blok diagram yang dapat dengan mudah diatur sedemikian rupa, sesuai dengan model matematis dari sistem atau *plant* yang akan dikendalikan.



Gambar 2.11 Tampilan Model Simulink pada Matlab



Gambar 2.12 Kotak Dialog *Simulink Library*



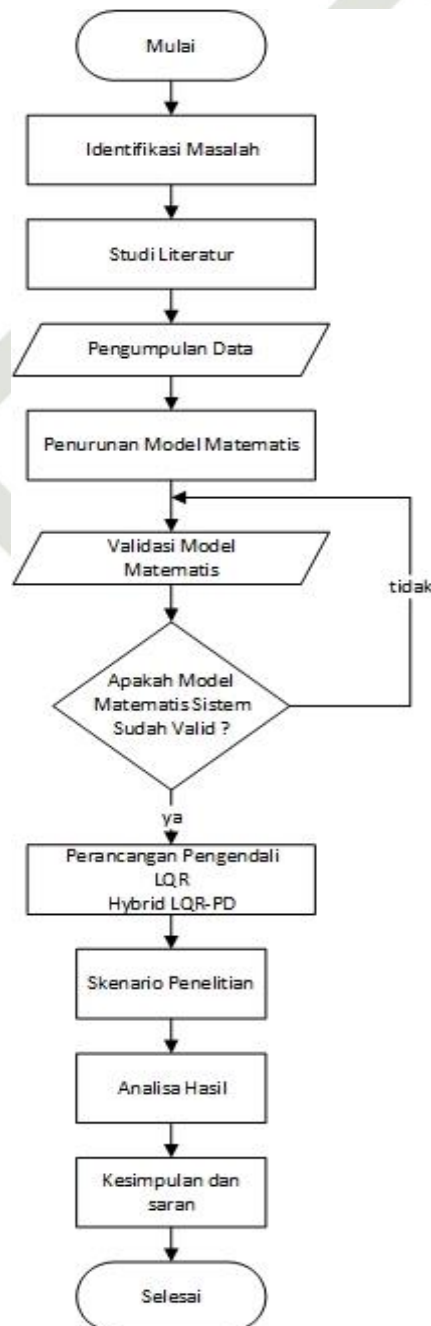
### 3.1 Proses Alur Penelitian

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan maupun langkah-langkah yang dilakukan penulis, mulai dari studi literatur hingga hasil akhir dalam penelitian Tugas Akhir ini. Berikut ini merupakan tahapan yang dilakukan penulis :



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

### 3.2 Tahapan Penelitian

Berdasarkan Flowchart diatas, dalam penelitin yang dilakukan dapat mencapai tujuan yang diharapkan, maka beberapa tahapan yang harus dilakukan sebagai berikut :

#### 1. Identifikasi masalah

Mencari masalah yang terdapat pada sistem motor *brushless* DC dengan melakukan *review* dari beberapa referensi yang berkaitan dengan pengendalian pada motor *brushless* DC

#### 2. Studi Literatur

Melakukan *review* dan mempelajari referensi yang berkaitan dengan penelitian ini, mengenai motor *brushless* DC dan perancangan pengendali LQR dan PD

#### 3. Pengumpulan data

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data-data sebelum membuat desain yang diperlukan untuk tahap selanjutnya

#### 4. Penentuan Variabel

Data-data yang didapat dari pengumpulan data pra desain diubah dalam bentuk model matematis dengan persamaan transfer fungsi sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}$$

#### 5. Validasi model matematis

Tahapan ini untuk pengujian model matematis plant dalam bentuk transfer fungsi dari sistem motor *bushless* DC yang diubah ke dalam bahasa program matlab *Simulink* untuk menyesuaikan hasil keluaran dari sistem dengan referensi yang digunakan

#### 6. Desain pengendali

Penelitian ini menggunakan pengendali LQR yang dikombinasikan dengan pengendali PD. Untuk merancang pengendali LQR, terlebih dahulu dilakukan penurunan matematis pengendali LQR. Selanjutnya melakukan perancangan pengendali PD dan mengkombinasikan pengendali LQR dengan pengendali PD

#### 7. Skenario Penelitian

Skenario penelitian merupakan tahap atau Langkah secara umum tentang penelitian yang dilakukan seperti melakukan pengujian terhadap sistem

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

©

Analisa hasil

Pada tahapan ini digunakan untuk melihat hasil keluaran respon sistem yang meliputi *rise time*, *selting time*, serta *error steady state* dari perancangan pengendali apakah respon sistem sudah sesuai dengan tujuan yang diharapkan.

Kesimpulan dan saran

Setelah dilakukan analisa hasil dan sesuai dengan tujuan maka penelitian yang dilakukan berhasil dan dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian. Serta memberikan saran-saran yang berguna untuk dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

### 3.3 Pemodelan matematis

Data-data parameter kecepatan motor *brushless* DC yang telah ditetapkan sebelumnya disubstitusikan ke model matematis yang diturunkan pada persamaan (2.36) sehingga plant dapat disubstitusikan. Berdasarkan model matematis pada persamaan (2.36) maka didapatkan plant kecepatan motor *brushless* DC yaitu :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}$$

Nilai dari  $K_e$ ,  $\tau_m$ , dan  $\tau_e$  perlu dihitung untuk mendapatkan model motor. Dapat dicari menggunakan dari persamaan 2.29

$$\tau_e = \frac{L}{R}$$

$$\tau_e = \frac{92.5 \times 10^{-3}}{3 \times 1.20}$$

$$\tau_e = 155.56 \times 10^{-6}$$

Tapi  $\tau_m$  adalah bagian fungsi dari  $R$ ,  $J$ ,  $K_e$  dan  $K_t$

Dimana

$$R = 1.2\Omega$$

$$L = 92.5 \text{ gcm}^2 = 9.25 \times 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

$$K_t = 25.5 \text{ mNm/A} = 25.5 \times 10^{-3} \text{ Nm/A}$$

$$\tau_m = 17.1 \text{ Ms} = 0.0171 \text{ s}$$

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Dari persamaan 2.28  $K_e$  dapat dihitung :

$$\tau_m = \frac{3 \cdot J \cdot R}{k_e \cdot k_t} = 0.0171 \text{ s}$$

$$k_e = \frac{3 \cdot J \cdot R}{\tau_m \cdot k_t}$$

$$k_e = \frac{3 \cdot 92.5 \times 10^{-6} \cdot 1.2}{0.0171 \cdot 25.5 \times 10^{-3}}$$

$$k_e = 0.0763 \frac{\text{v-sec}}{\text{rad}}$$

Lalu didapat  $G(s)$  menjadi :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{0.0763}}{0.0171 \cdot 155.56 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0171 \cdot s + 1}$$

$$G(s) = \frac{13.11}{0.266 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0171 \cdot s + 1}$$

Dari Parameter  $K_s$  digunakan untuk mendapatkan setpoint

$$K_s = 37.4 \text{ Rpm/V}$$

Pengambilan setpoint 1 volt :

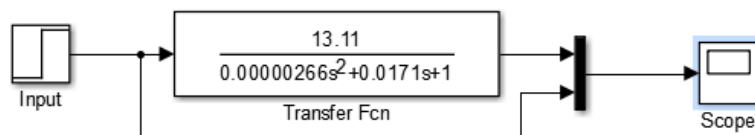
$$k_s = 37.4 \frac{\text{Rpm}}{\text{Volt}}$$

$$1 \text{ Volt} = 37.4 \text{ Rpm}$$

### 3.4 Validasi Model Matematis

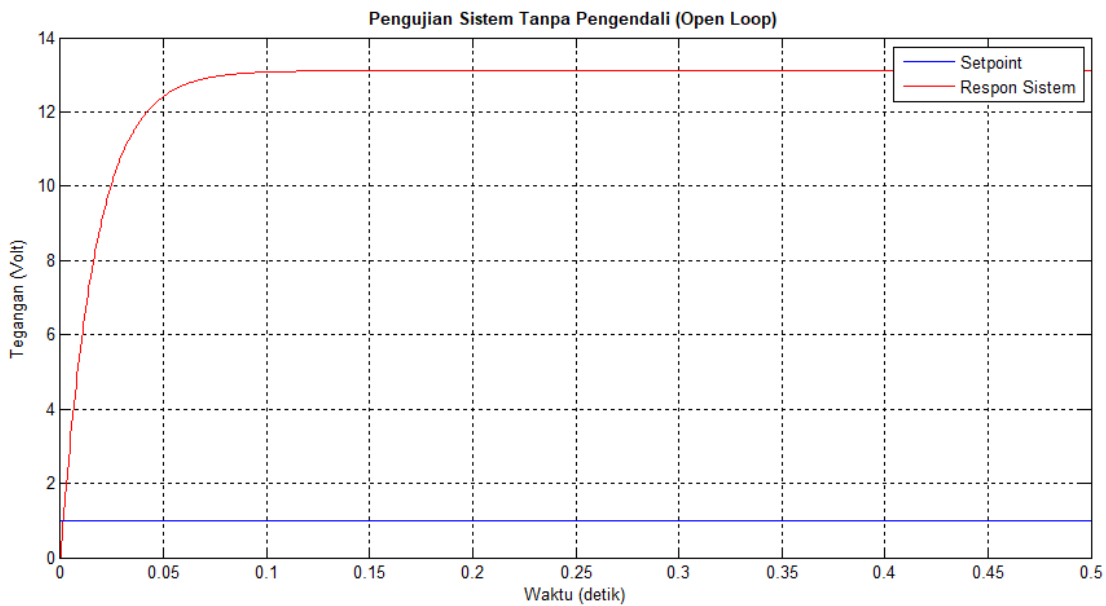
Untuk menvalidasi model matematis untuk motor *brushless* DC dilakukan menggunakan perangkat *Simulink Matlab R2014a* secara *open loop* dari penurunan nilai yang didapatkan. Variabel untuk menetapkan nilai *setpoint* motor *brushless* DC yaitu 1 Volt.

Rangkaian *open loop* dapat disusun sebagai berikut :



Gambar 3.1 rangkaian Motor *brushless* DC dengan *open loop*

Maka respon transient plant dibawah ini :



Gambar 3.2 Grafik keluaran motor *brushless* DC dengan *open loop*

Pada gambar 3.2 merupakan keluaran hasil respon sistem secara *open loop* dari motor *brushless* DC tanpa menggunakan pengendali yang disimulasikan menggunakan *software* matlab. Hasil respon keluaran dari *open loop* menunjukkan keluaran grafik sistem motor *brushless* DC melebihi *setpoint* yang telah ditentukan. Pengujian sistem secara *open loop* pada motor *brushless* DC ini perlu dipasangkan pengendali yang dapat menstabilkan dan membuat sistem ini mencapai *setpoint* yang telah ditentukan [7].

### 3.5 Perancangan Pengendali

#### 3.5.1 Perancangan Pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR)

Persamaan transfer fungsi dari motor *brushless* DC diubah dalam bentuk *state space* karena pada perancangan pengendali LQR membutuhkan pemodelan *state space* dari sistem. Adapaun pemodelan *state space* tersebut adalah :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{13.11}{0.266 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0171 \cdot s + 1}$$

Dari turunan transfer fungsi pada persamaan motor *brushless* DC tersebut kemudian diturunkan dengan menggunakan transformasi laplace balik sehingga diperoleh persamaan diferensial orde dua :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{13.11}{0.266 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0171 \cdot s + 1}$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$13.11 U(s) = 02.66 \times 10^{-6} s^2 Y(s) + 0.0171 s Y(s) + Y(s)$$

$$13.11 U = 02.66 \times 10^{-6} \frac{d^2 y}{dt^2} + 0.0171 \frac{dy}{dt} + y$$

$$13.11 U = 02.66 \times 10^{-6} \ddot{y} + 0.0171 \dot{y} + y$$

$$02.66 \times 10^{-6} \ddot{y} = -0.0171 \dot{y} - y + 13.11 U$$

$$\ddot{y} = \frac{-0.0171 \dot{y} - y + 13.11 U}{0.00000266}$$

$$\ddot{y} = -6428.57 \dot{y} - 375939.85 y + 4928571.43 U$$

Didefinisikan :

$$x_1 = y \rightarrow \dot{x}_1 = x_2 = \dot{y}$$

$$x_1 = y \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} = -6428.57 \dot{y} - 375939.85 y + 4928571.43 U$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{y} = -6428.57 \dot{y} - 375939.85 y + 4928571.43 U$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -375939.85 & -6428.57 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 4928571.43 \end{bmatrix} U$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Jadi, dari persamaan diatas didapatkan nilai matriks A, B, C, D yaitu sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -375939.85 & -6428.57 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 4928571.43 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

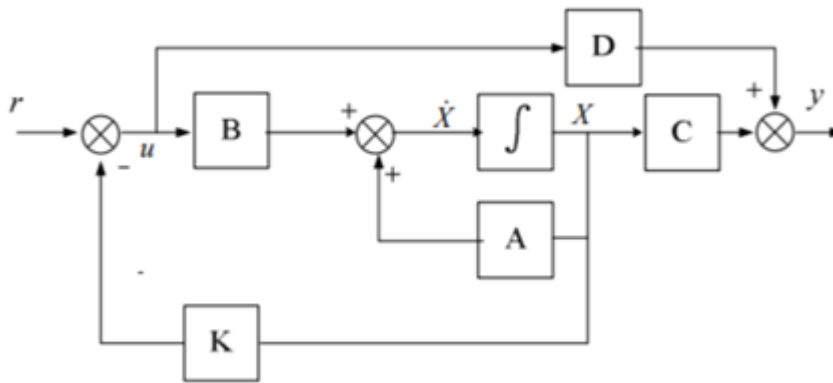
$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

Perancangan pengendali LQR adalah berdasarkan penurunan persamaan matematis LQR pada bab 2. Sehingga berdasarkan turunan matematis dan skema LQR yang sudah didapatkan akan dibuat ke Simulink. Blok-blok diagram dan rangkaian Simulink pengendalian LQR pada sistem motor *brushless* DC diperlihatkan pada gambar berikut :

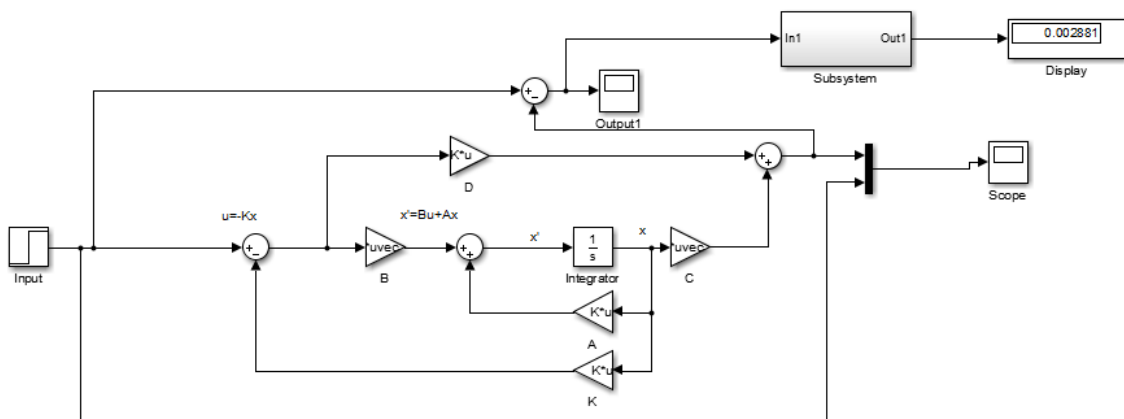


### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.3 blok diagram motor *brushless* DC menggunakan pengendali LQR



Gambar 3.4 rangkaian motor *brushless* DC menggunakan pengendali LQR

Setelah rangkaian pengendali LQR dirancang. Maka langkah selanjutnya membuat program yang bertujuan untuk mencari nilai matriks R dan Q dengan memasukkan nilai matriks A, B, C, dan D. Matriks *Gain Feedback* K dan matriks *definit positif* S didapatkan setelah merancang pengendali LQR dan membuat program di M-file. Adapun program yang dimasukkan dalam M-file adalah seperti yang di tunjukkan pada gambar dibawah ini :

```

1 - A=[0 1 ; -375939.85 -6428.57];
2 - B=[0; 4928571.43];
3 - C=[1 0];
4 - D=[0];
5 - R=[1];
6 - Q=[2 0; 0 0];
7 - N=[0];
8 - sys=ss(A,B,C,D)
9 - [K,S,e]=lqr(sys,Q,R,N)
    
```

Gambar 3.5 Tampilan Program M-file Motor Brushless DC Menggunakan Pengendali LQR

Perhitungan untuk pengendali LQR dilakukan dengan memasukkan persamaan *state space* yang telah didapatkan kedalam *software* matlab. Dalam melakukan simulasi menggunakan pengendali LQR dibutuhkan matriks Q dan R yang optimal. Untuk mendapatkan matriks Q dan R yang optimal dilakukanlah dengan cara menetapkan matriks R bernilai konstan yaitu 1, sehingga didapatkan nilai matriks Q adalah bilangan itu sendiri, karena hal inilah yang diinginkan. Penentuan matriks Q menggunakan *trial and error* dengan analisa IAE. Percobaan *trial and error* dengan analisa IAE dapat dilihat pada tabel

Tabel 3.1 matriks R konstan dengan analisa IAE

NO.	Matriks R	Matriks Q	IAE
1	[1]	$\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	1.026
2	[1]	$\begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.5974
3	[1]	$\begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.4016
4	[1]	$\begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.2835
5	[1]	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.2024
6	[1]	$\begin{bmatrix} 0.6 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.1423
7	[1]	$\begin{bmatrix} 0.7 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.09544
8	[1]	$\begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.05766
9	[1]	$\begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.02637
10	[1]	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.002881
11	[1]	$\begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.02583
12	[1]	$\begin{bmatrix} 1.2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.04587
13	[1]	$\begin{bmatrix} 1.3 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.06357
14	[1]	$\begin{bmatrix} 1.4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.07934
15	[1]	$\begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.09352

16	[1]	$\begin{bmatrix} 1.6 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.1064
17	[1]	$\begin{bmatrix} 1.7 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.118
18	[1]	$\begin{bmatrix} 1.8 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.1287
19	[1]	$\begin{bmatrix} 1.9 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.1386
20	[1]	$\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.1477

Pada tabel percobaan dilakukan *trial and error* dengan memasukkan nilai matriks Q yaitu  $\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  kemudian didapatkan nilai IAE namun respon keluaran melebihi dari nilai *setpoint*. Selanjutnya dilakukan penambahan nilai matriks Q sebesar 0.1, nilai IAE semakin kecil namun respon keluaran masih melebihi nilai *setpoint*. Pada nilai matriks Q sebesar 0.5 nilai respon keluaran mendekati *set point* sehingga dilakukan penambahan nilai lagi sebesar 0.1, sampai pada matriks  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  pada matriks ini keluaran respon sistem telah mencapai *setpoint* dan didapatkan nilai IAE yang kecil. Selanjutnya dilakukan kembali penambahan nilai matriks sebesar 0.1 pada matriks  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , pada penambahan nilai matriks ini terjadinya kenaikan nilai IAE dan respon keluar sistem tidak mencapai nilai *setpoint*. Pada matriks Q =  $\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  nilai IAE lebih besar dari pada matriks Q =  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  dan respon keluaran sistem semakin tidak mencapai *setpoint*. Sehingga dilakukan perancangan pengendali LQR dengan menggunakan matriks Q =  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , matriks R = [1] dan nilai IAE = 0.02055 pada pengendalian sistem kecepatan motor *brushless* DC didapatkan nilai matriks optimal *Gain Feedback* K[0.9266 0.0001] dan matriks S definit positif  $\begin{bmatrix} 0.0013 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

### 3.5.2 Perancangan Pengendali LQR-PD

Setelah mempelajari desain pengendali LQR maka langkah selanjutnya dapat dilakukannya penggabungan antara pengendali optimal LQR dengan pengendali PD agar kinerja dari pengendali LQR menjadi optimal dan lebih baik.

Nilai parameter PD pada saat melakukan tuning menggunakan metode heuristik, didapatkan nilai Kp = 4 dan Kd = 0.0016. Blok diagram untuk desain pengendali LQR-PD pada sistem pengendalian kecepatan motor *brushless* DC adalah sebagai berikut :





Tabel 3.2 tabel penalaan Pengendali LQR-PD menggunakan metode Heuristic untuk mendapatkan nilai PD

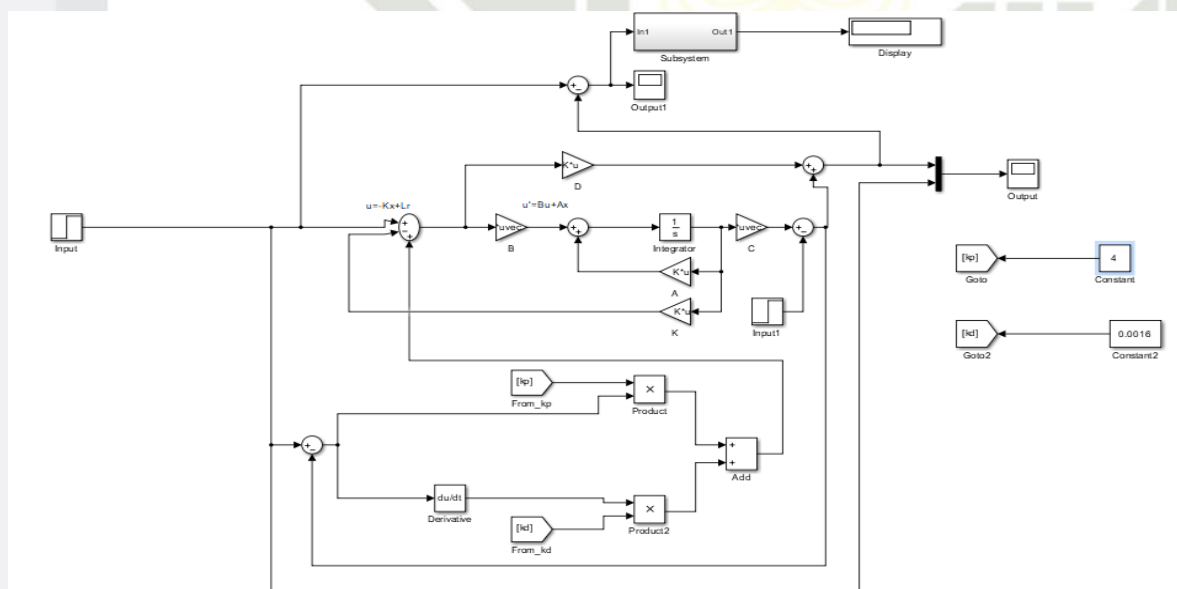
Setpoint (Volt)	Pengendali LQR		Uji Metode Heuristic		Rise Time (detik)	Settling Time (detik)	Error Steady State
	Matriks R	Matriks Q	Kp	Kd			
1	[1]	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0.5	-	0.0024	0.0039	0.0019
			1	-	0.0017	0.0023	0.0014
			1.5	-	0.0012	0.0017	0.0011
			2	-	0.0010	0.0013	0.0010
			2.5	-	0.0008	0.0010	0.0008
			3	-	0.0007	0.0008	0.0007
			3.5	-	0.0006	0.0007	0.0005
			4	-	0.0005	0.0006	0.0003
			0.5	0.01	0.0226	0.0306	0.0019
			1	0.008	0.0140	0.0188	0.0015
			1.5	0.006	0.0088	0.0118	0.0012
			2	0.004	0.0053	0.0071	0.0010
			2.5	0.002	0.0028	0.0038	0.0008
			3	0.001	0.0016	0.0022	0.0006
			3.5	0.0013	0.0016	0.0022	0.0003
			4	0.0016	0.0016	0.0022	0

Pada tabel percobaan dilakukan metode heuristic dengan memasukkan nilai Kp yaitu 0.5 kemudian didapatkan nilai *error steady state* sebesar 0.0019V dengan *Rise Time* 0.0024 detik dan *Settling Time* 0.0039 detik. Selanjutnya dilakukan penambahan sebesar 0.5, nilai

*error steady state* semakin turun serta *Rise Time* dan *Settling Time* semakin cepat. Nilai Kp berhenti pada Kp = 4 menghasilkan *error steady state* 0.0003V dengan *Rise Time* 0.0005 detik dan *Settling Time* 0.0006 detik. maka dilakukan penalaan nilai Kp dan Kd secara bersamaan yaitu nilai Kp 0.5 dan Kd 0.01 menghasilkan *error steady state* 0.0019V dengan *Rise Time* 0.0226 detik dan *Settling Time* 0.0306 detik. selanjutnya dilakukan Kembali penmbahan nilai sebesar 0.5 pada Kp dan penurunan nilai pada Kd sebesar 0.002. sehingga nilai Kp 1 dan Kd 0.008 menghasilkan *error steady state* 0.0015 dan waktu yang lebih cepat yaitu *Rise Time* 0.0140 detik dan *Settling Time* 0.0188 detik. Pada saat nilai Kp 4 dan Kd 0.0016 *error steady state* sudah tidak ada lagi yaitu bernilai 0V serta *Rise Time* 0.0016 detik dan *Settling Time* 0.0022 detik.

### 3.5.3 Perancangan Pengendali LQR-PD dengan Gangguan

Untuk mengetahui performa pengendali LQR-PD dalam mengatasi gangguan pada motor *brushless* DC yang dimana gangguan pada motor didefenisikan sebagai perubahan beban naik. Gangguan yang diberikan sebesar 10% dari *setpoint* dan sinyal gangguan akan diberikan pada detik ke 0.42, kemudian menganalisa dampak dan perubahan respon sistem dari pengendali tersebut. Berikut ini adalah blok diagram pengendali LQR-PD saat diberikan sinyal gangguan :



Gambar 3.8 rangkaian pengendali LQR-PD dengan gangguan

### 3.6 Skenario penelitian

Pada skenario penelitian ini model sistem harus disimulasikan dengan beberapa skenario (minimal 3 skenario), dimana masing-masing skenario menghasilkan minimal satu



Penelitian ini menggunakan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan hybrid LQR-PD dengan memasukkan data-data yang telah didapatkan pada pemodelan matematis sebelumnya ke dalam program Matlab. Berdasarkan penelitian terkait dengan menggunakan nilai *setpoint* 1 V. Sinyal gangguan didefenisiakn sebagai tegangan turun. Gangguan diberikan sebsesar 10% dari setpoint pada detik ke 0.42. Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian dengan melihat hasil simulasi, data yang diambil yaitu *respons transient* dan kokoh Pengendali LQR-PD terhadap gangguan. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu :

1. Simulasi sistem secara open loop
2. Simulasi menggunakan pengendali LQR
3. Simulasi menggunakan pengendali hybrid LQR-PD
4. Simulasi menggunakan pengendali hybrid LQR-PD dengan pemberian gangguan

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi dan Analisa respon sistem yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa pengendali LQR tidak dapat mengatasi *error steady state* pada sistem motor *brushless* DC. Dengan kombinasi LQR-PD dapat menghilangkan *error steady state* yang ada pada pengendali LQR, dan dengan kombinasi LQR-PD untuk mengendalikan kecepatan motor *brushless* DC mampu menghasilkan respon yang cepat dengan nilai *settling time* 0.00228 detik, *rise time* 0.00168 detik. Saat diberikan gangguan respon sistem pada detik ke 0.42 terdapatnya *error steady state* yang terjadi sebesar 0.0208 V. Oleh karena itu, pemberian gangguan di pengendali LQR-PD tidak dapat mempertahankan kekokohnya pada keadaan *setpoint*.

#### 5.2 SARAN

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, untuk penelitian selanjutnya bisa digunakan dengan pengendali yang berbeda dalam mengatasi *error steady state* baik itu tanpa ada gangguan maupun adanya gangguan yang ada pada sistem. Pada penelitian ini, metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai PD yaitu metode heuristik, sehingga dalam proses *tunning* membutuhkan waktu yang sangat lama sehingga, untuk proses penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan pengendali seperti LQG, JST, MPC, dan lain lain agar dapat dilakukan perbandingan.

UIN SUSKA RIAU

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Khana, A. Kumar, A, "*Speed Control of DC Motor Be Colony Optimization Techiqueu*", Universal Jurnal of Electrical and Elecktronik Engineering , 2013.
- [2] M. K. Sari, "*Analisa Motor Brushless Direct Current Aksial Flux 3 Fasa Menggunakan Magnet Permanen Neodymium Prime Mover Generator*", vol. 19, Desember 2020.
- [3] T. Huda, "*Pengaruh Jarak Air Gap Pada Performance Motor Brushless Direct Current Jenis Exterior Rotor*", vol. 1, no. 3, Desember 2017.
- [4] Y.D Agung, H.D Sasangko, Suharyanto, "*Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan Metode Logika Fuzzy*", vol. 12, 2 juni 2015.
- [5] A. P. Vinod K.R Singh Patel, "*Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor*", vol. 3, no. 4, 4 April 2013.
- [6] Nurliana, "*Simulation Of Speed Control Brushless DC Motor Using Gaussian Fuzzy Logic Controller*", 2014.
- [7] Jhon, Oludayo, "*PID CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR AND ROBOT TRAJECTORY PLANNING AND SUMULATION WITH MATLAB/SIMULINK*", 2009.
- [8] K. Ogata, dalam "*Modern Control Engineering*", 5 th penyunt., A. Gilfillan, Penyunt., Prentice Hall, 2010, p. 793.
- [9] Kardono,dkk, "*perancangan dan implementasi sistem pengaturan optimal LQR untuk menjaga kestabilan hover pada Quadcopter*", institusi Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2012.
- [10] K. Ogata, dalam "*Teknik Kontrol Automatik Edisi 2 jilid 1*", Jakarta, Prentice Hall, 1970.
- [11] Lewis Frank L dan Syrmos, Vassilis L, dalam "*Optimal Control*", Jhon Wiley dan Sons,inc, 1995.



#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [12] M. S. Z. Nor Rochmad Hadi Prasetya, *"Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Pengendali Linier Quadratic Regulator (LQR)"*, Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, 2019.
- [13] H. Hudalbly, *"Desain kontroler Fuzzy PID Gain Scheduling untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Tanpa Sikat"*, 2015.
- [14] E. Fauzi Yuda Pratama, *"Rancang Bangun Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC Motor Tipe A2212/10T 1400 KV menggunakan Kontroler PID Berbasis Labview"*, vol. 7, no. 3, pp. 157-166, S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, 2018.
- [15] F. Arifin, *"Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Metode Model Predictive Control (MPC)"*, 2015.
- [16] K. Roedy, W. Oyas, N. Prpto, *"Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC menggunakan Algoritma Hybrid PID Fuzzy"*, 2015.
- [17] Depenbrok, M, *"on Power Electronics 3"*, Vol. %1 dari %2420, 1998, IEEE Trans.
- [18] M. Taufiq, *"Desain Kendali Optimal Linier Quadratik Regulator (LQR) - PID Pada Motor Induksi Tiga Fasa Untuk Pengendalian Kecepatan"*, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, UIN Suska Riau, 2017.
- [19] M. Poovizhi, M. Senthil Kumaran, *"Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor (BLDC) divers byb using matlab-simulink"*, Department of EEE SSN Collage of Engineering Chennai, India, 2017.
- [20] M. A. Abdul Halim, *"Pemodelan dan Desain Kendali Sistem Akuator Kendali Sirip Berbasis Brushless DC motor"*, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, 2012.
- [21] M. A. Erwani Merry Sartika, *"Simulasi Karakteristik Motor BLDC UAV," Universitas Kristen Maranatha.*

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [22] Firmansyah, Rifqi, dkk, *"Penerapan Kontroller LQR dengan Gain Feed Forward Statis untuk Tracking Pendulum Terbaik Dua Tingkat"*, Seminar Nasional Pendidikan Matematika Ahmad Dahlan (SENDIKMAD) Yogyakarta, 2012.
- [23] Candra, Widhayaka Aji, *"Pengaturan Kecepatan pada Simulator Paraller Hybrid elektrik Vihicle (PHEV) menggunakan Linier Quadratic Regulator (LQR) Berdasarkan Particle Swarm Optimization (SPO)"*, Vol. %1 dari %2vol .3, no I, (2014) 2337 3539, Jurnal Teknik Pomits, 2014.
- [24] Ali, Muhammad, *"Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software Matlab"*, Universitas Negeri Yogyakarta, 2004.
- [25] K. Ogata, dalam *"Modern Control Engineering"*, 5 th penyunt., A. Gilfillan, Penyunt., Prentice Hall, 2010, p. 169.
- [26] Permata Sari, Ranti, *"Penalaan Parameter Kontrol PID dengan Metode Heuristik Aplikasi Sistem Pengendalian Kecepatan Motor DC"*, vol. 1, no. 2, Elektro Institut Teknologi Nasional (ITENAS), 2010.
- [27] Cahyono, Budi, *"Penggunaan Software Matrix Labolatory (Matlab) dalam Pembelajaran Aljabar Linier"*, Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan Institut Agama Islam Negeri Walsiongso, 2013.
- [28] Moradi, M.A. Johnson and M.H., *"PID Control: New Identification and Design Methods"*, 2005.
- [29] T. W. Kurniawan, *"Perancangan Kontroler Neural Network-PID untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Brushless"*, 2016.

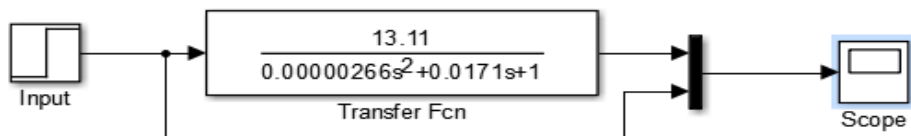
## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

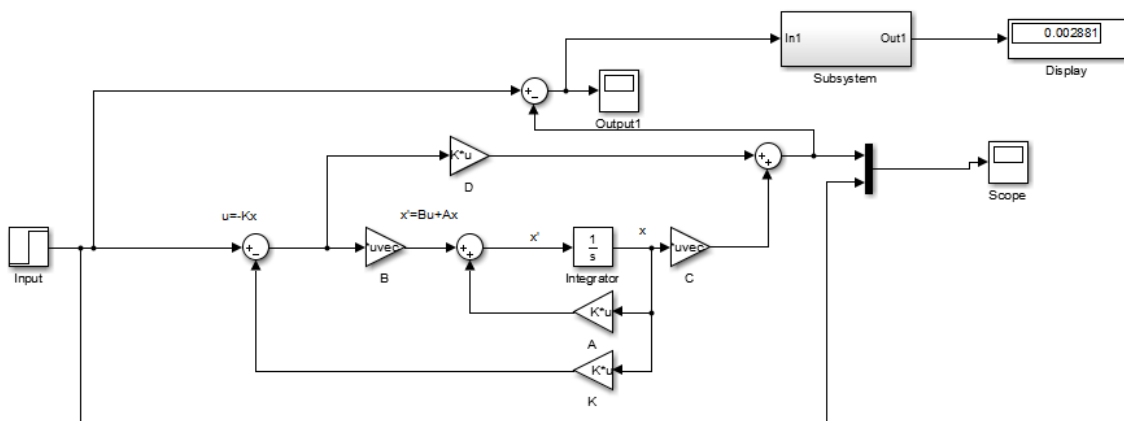
## LAMPIRAN A

### RANGKAIAN PENGENDALI PADA SIMULINK

#### 1. Rangkaian Motor *brushless* DC dengan *open loop*



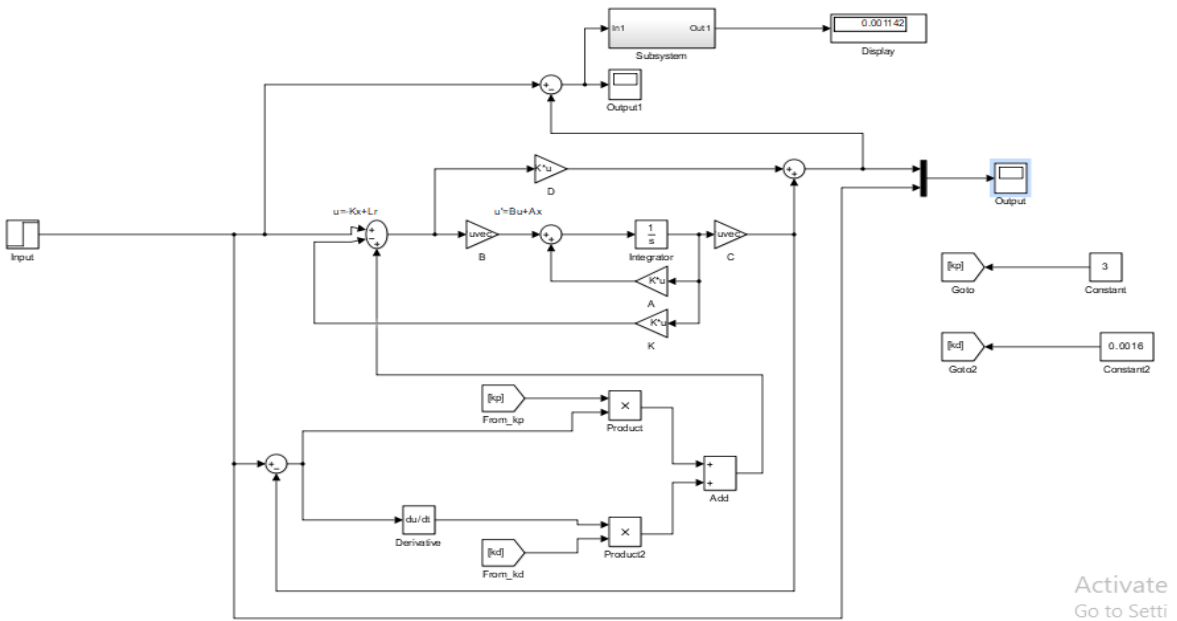
#### 2. Rangkaian motor *brushless* DC menggunakan pengendali LQR





## Hak Cipta Uinmuang-ungang-ungang

1. Diarar mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarar mengumukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

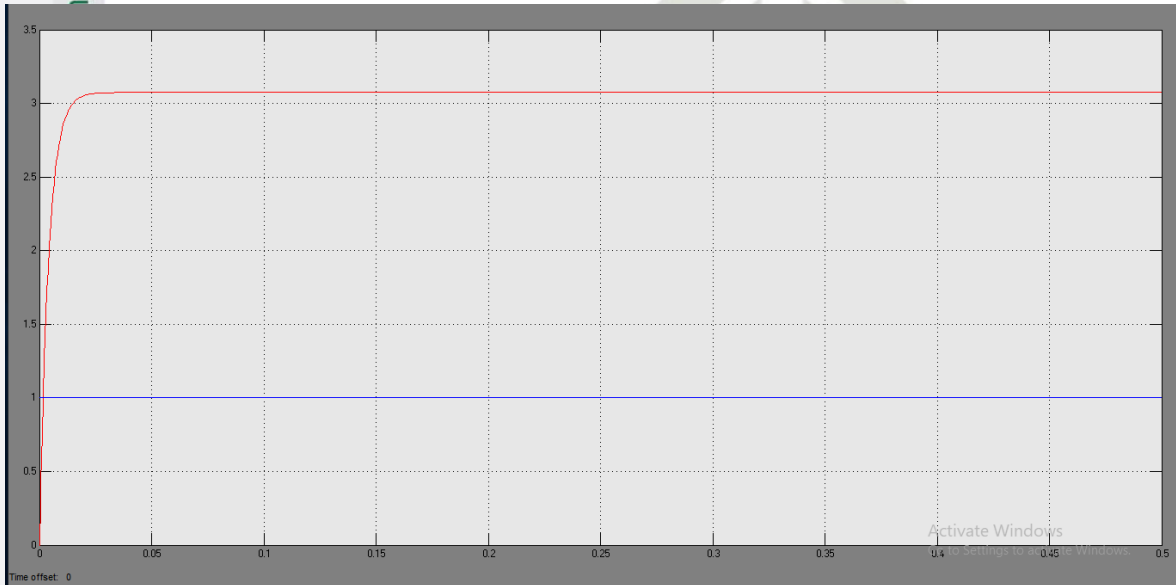
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## LAMPIRAN B

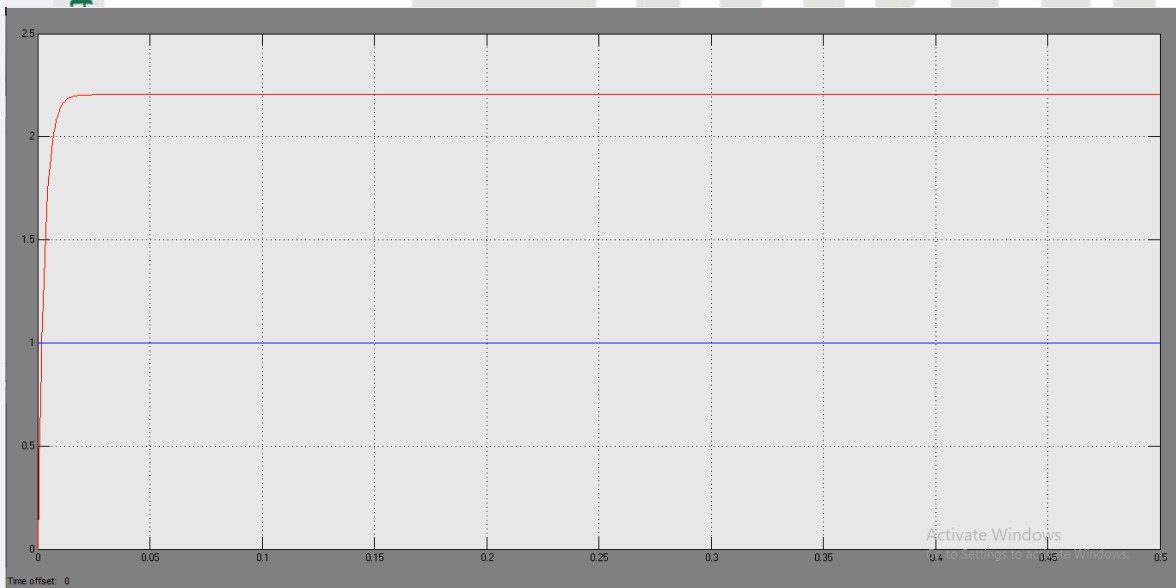
### HASIL SIMULASI TUNNING LQR

PROSES TUNNING LQR PADA MATRIKS Q DAN R UNTUK  
MENGENDALIKAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC

1. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.1$  dan  $R = 1$

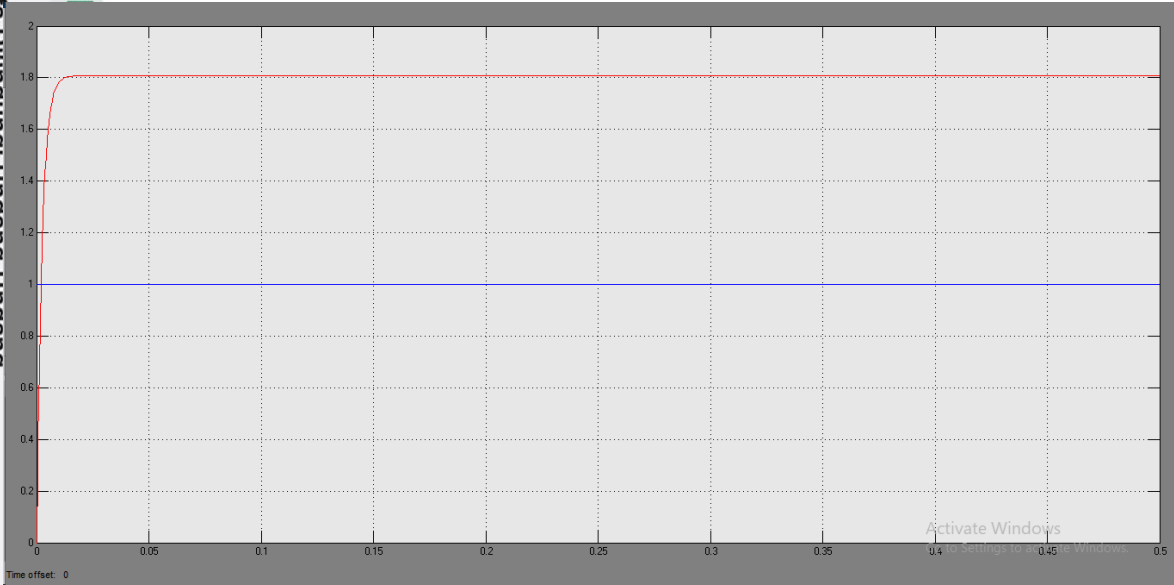


2. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.2$  dan  $R = 1$

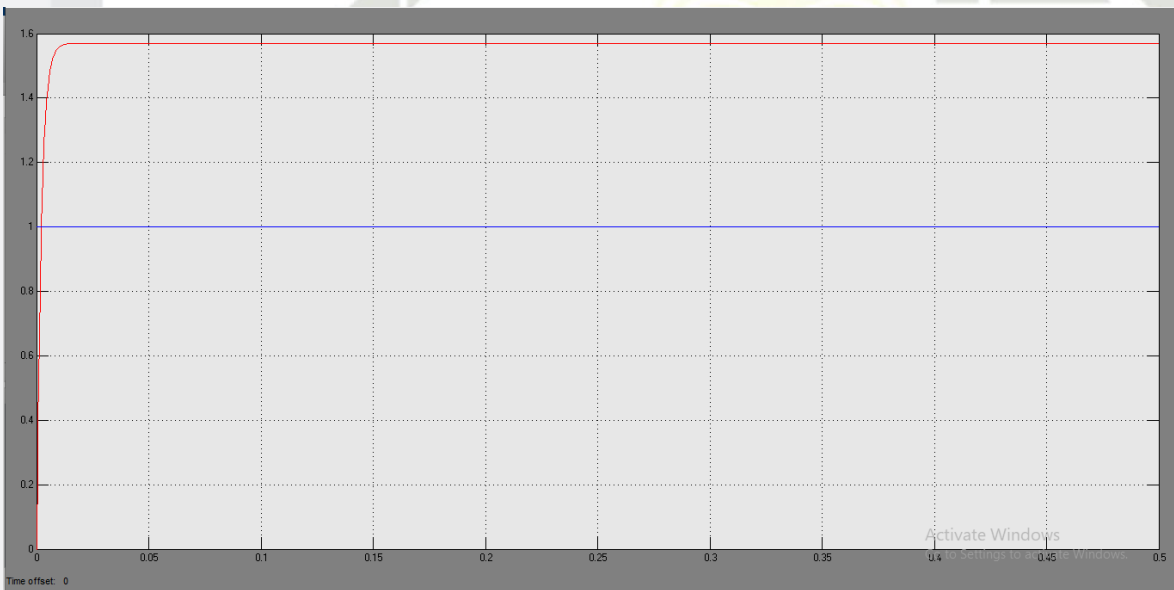


Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.3$  dan  $R = 1$

Hak Cipta Uinmuang-Unaang-Ungaang



4. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.4$  dan  $R = 1$

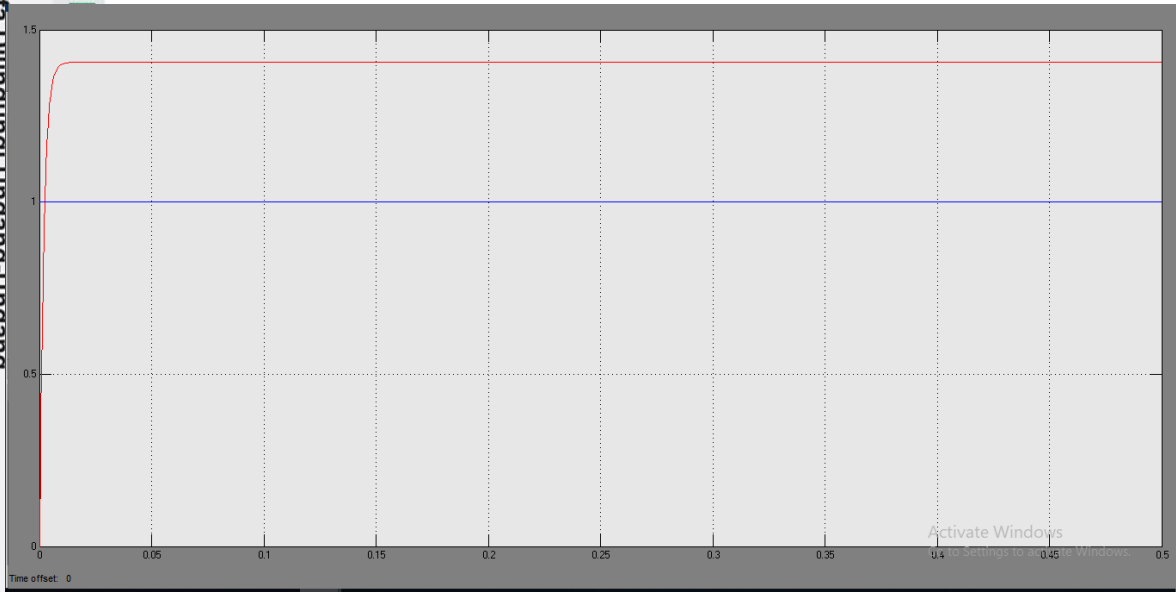


UIN SUSKA RIAU

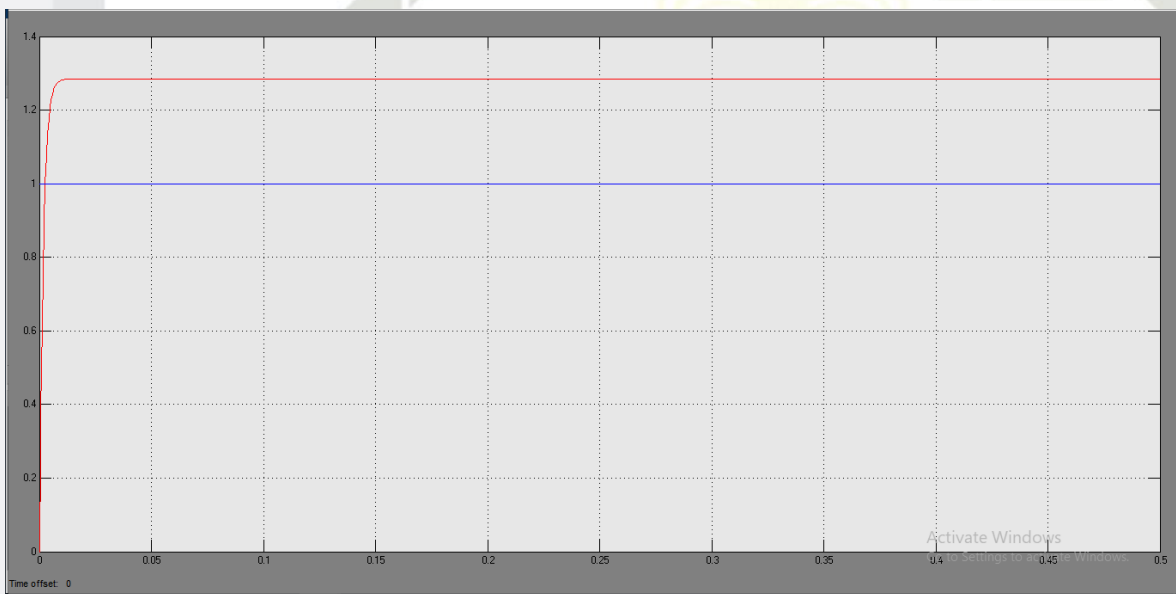


1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

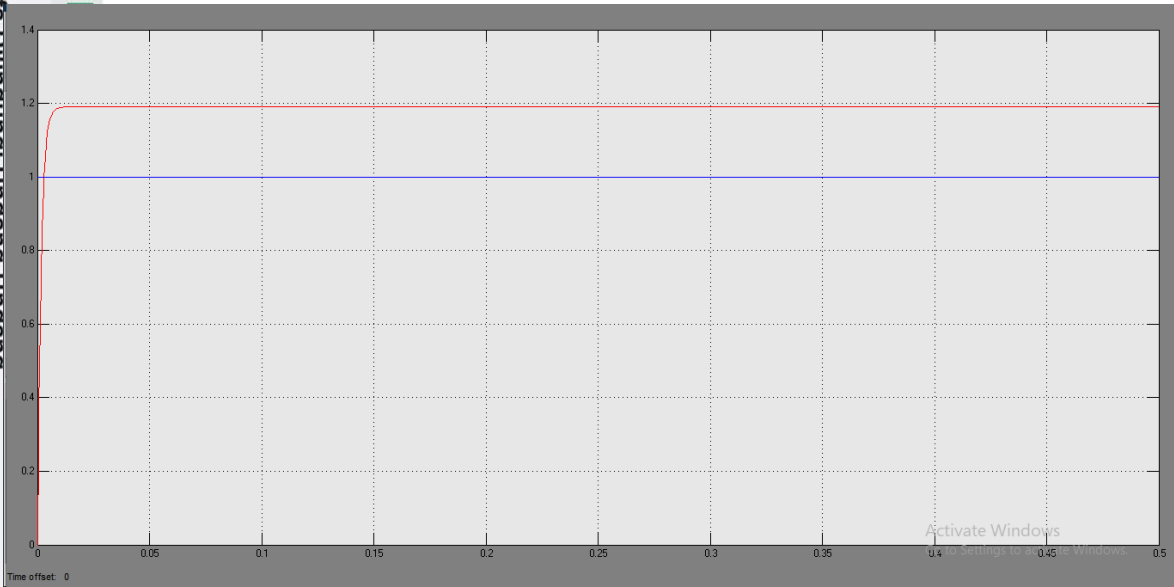
Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.5$  dan  $R = 1$



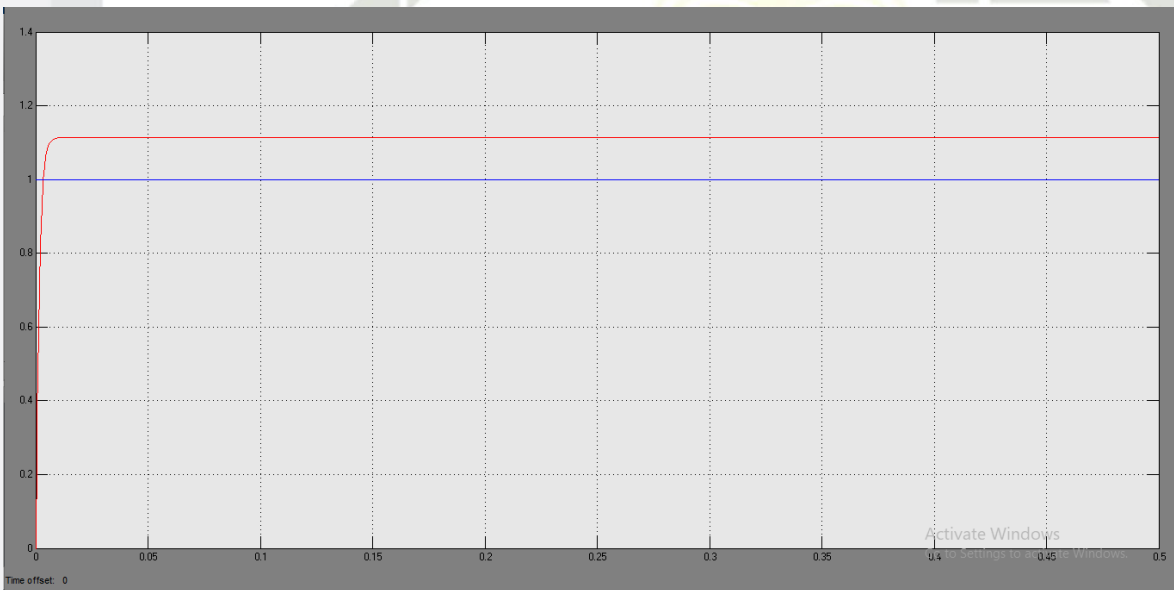
6. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.6$  dan  $R = 1$



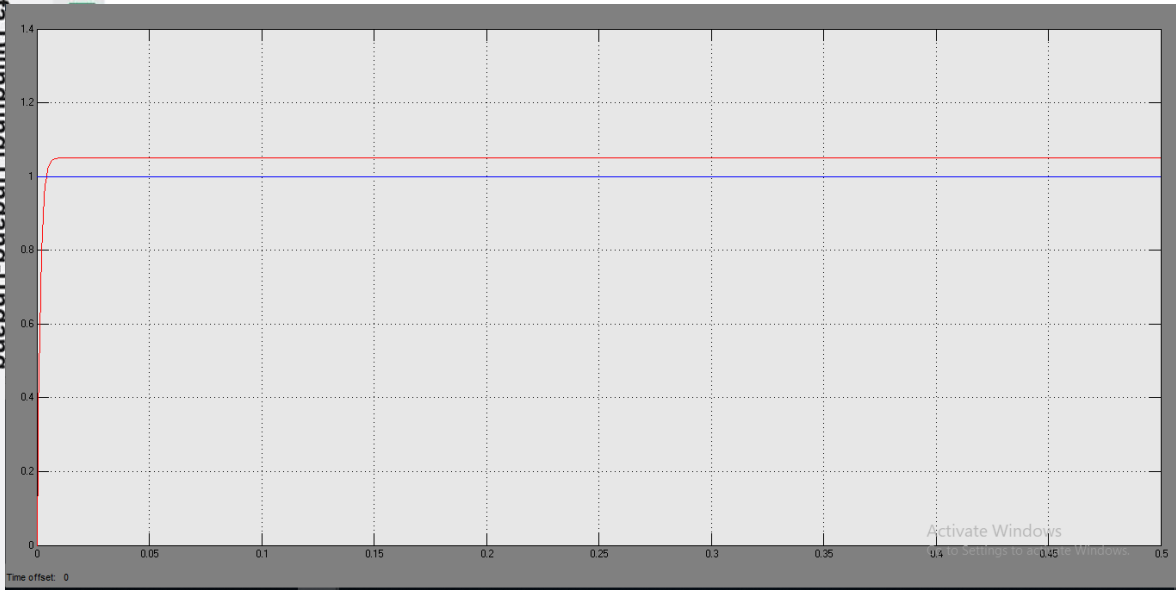
Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.7$  dan  $R = 1$



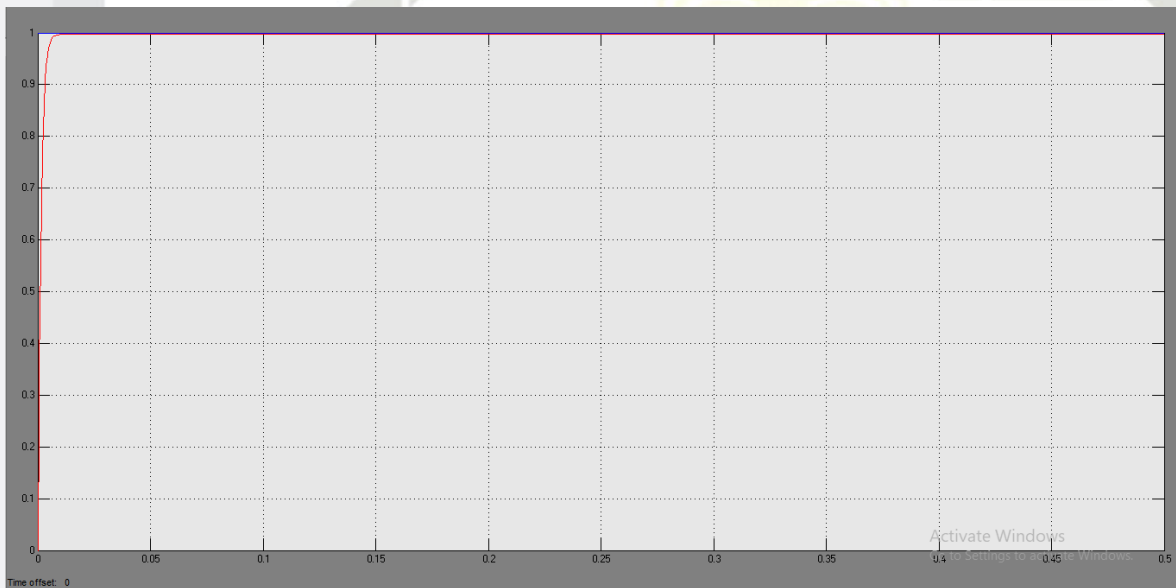
8. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.8$  dan  $R = 1$



Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 0.9$  dan  $R = 1$



10. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1$  dan  $R = 1$

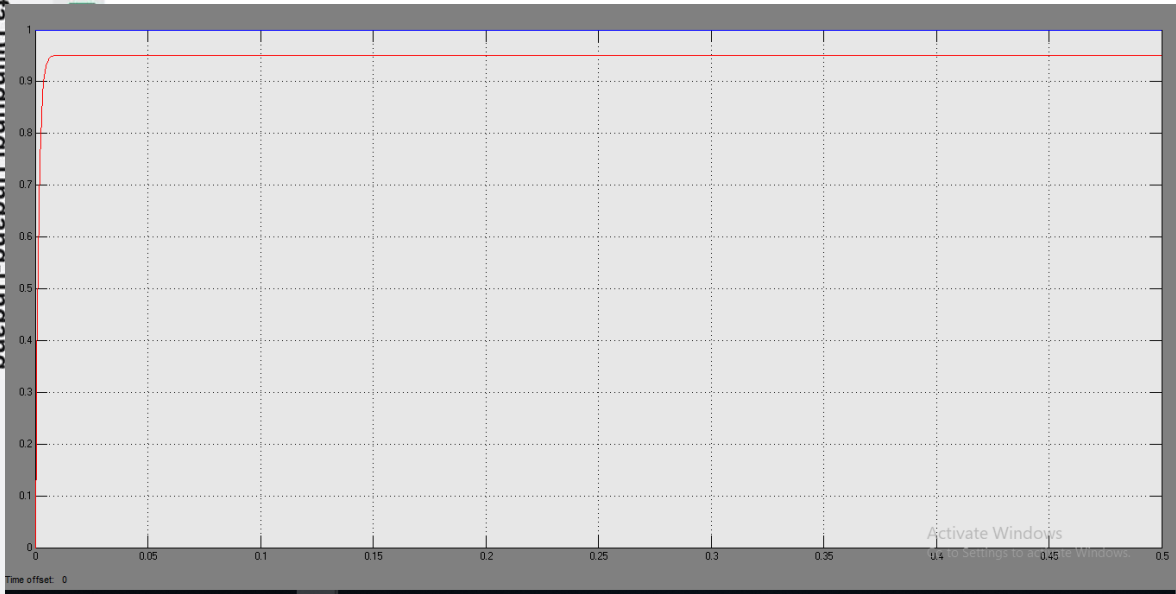


1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

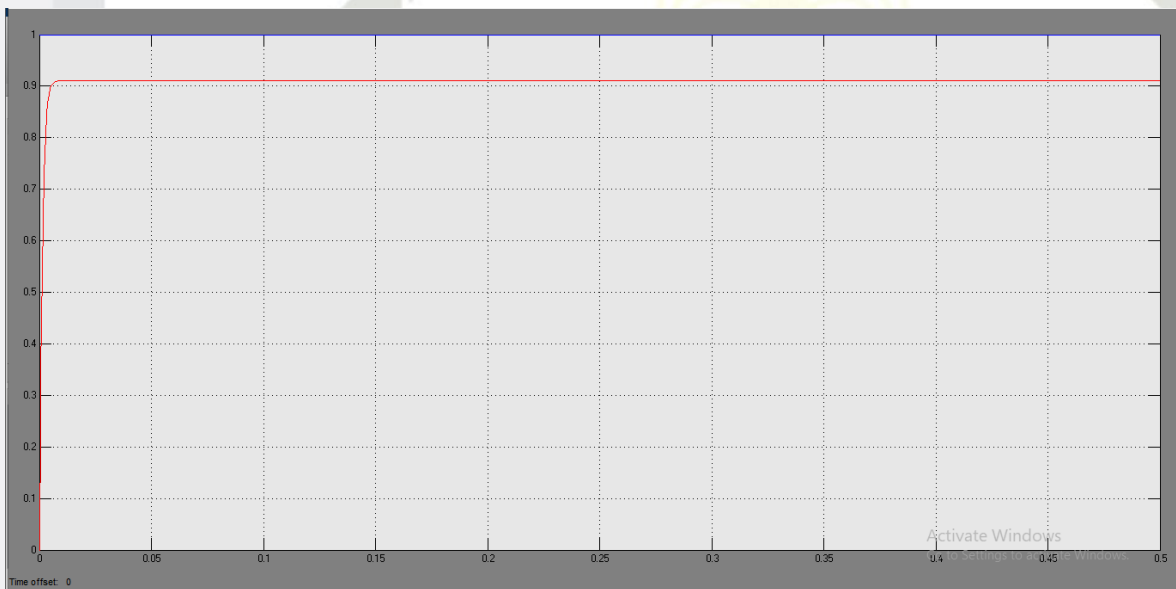


1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

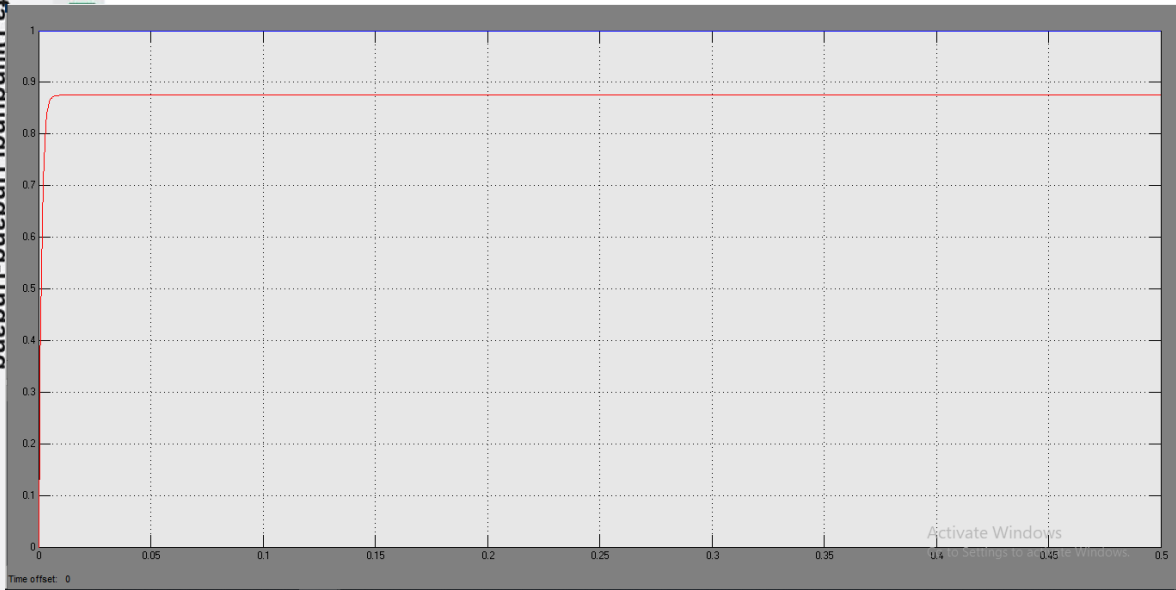
11. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.1$  dan  $R = 1$



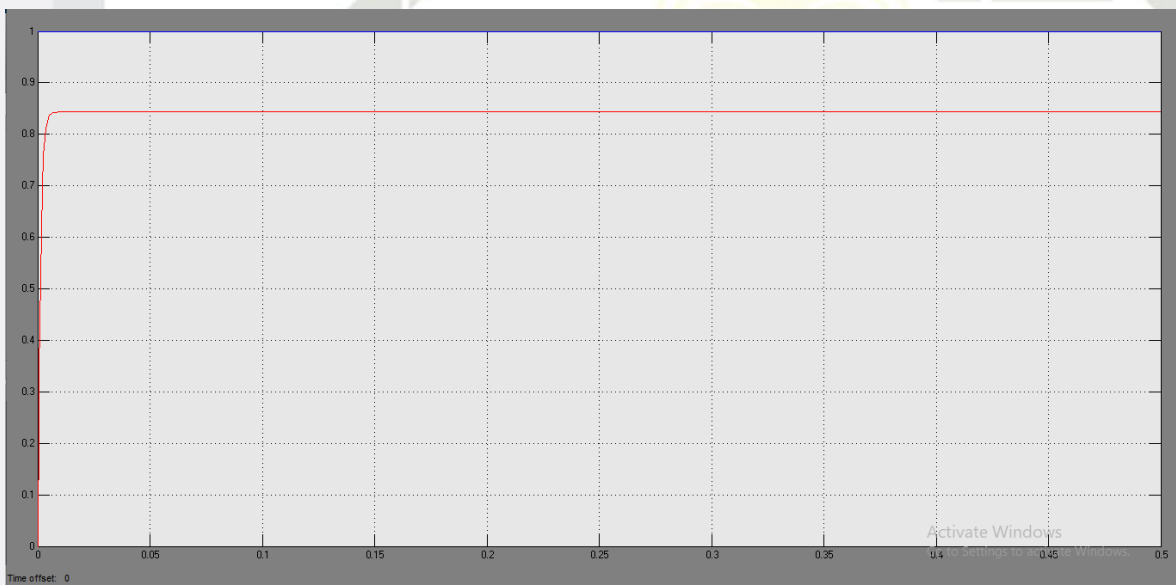
12. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.2$  dan  $R = 1$



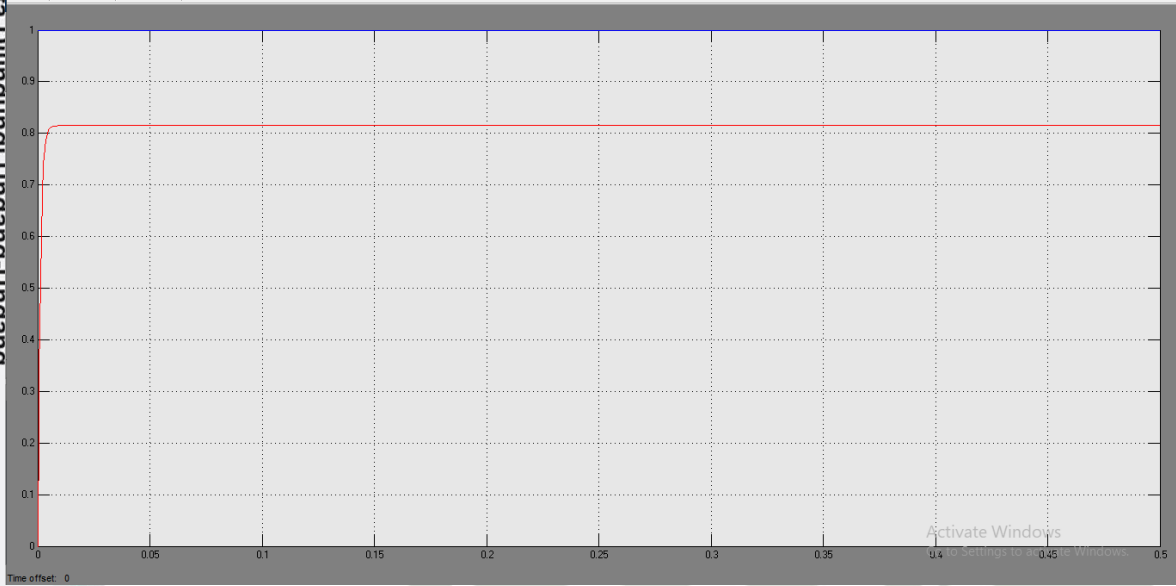
13. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.3$  dan  $R = 1$



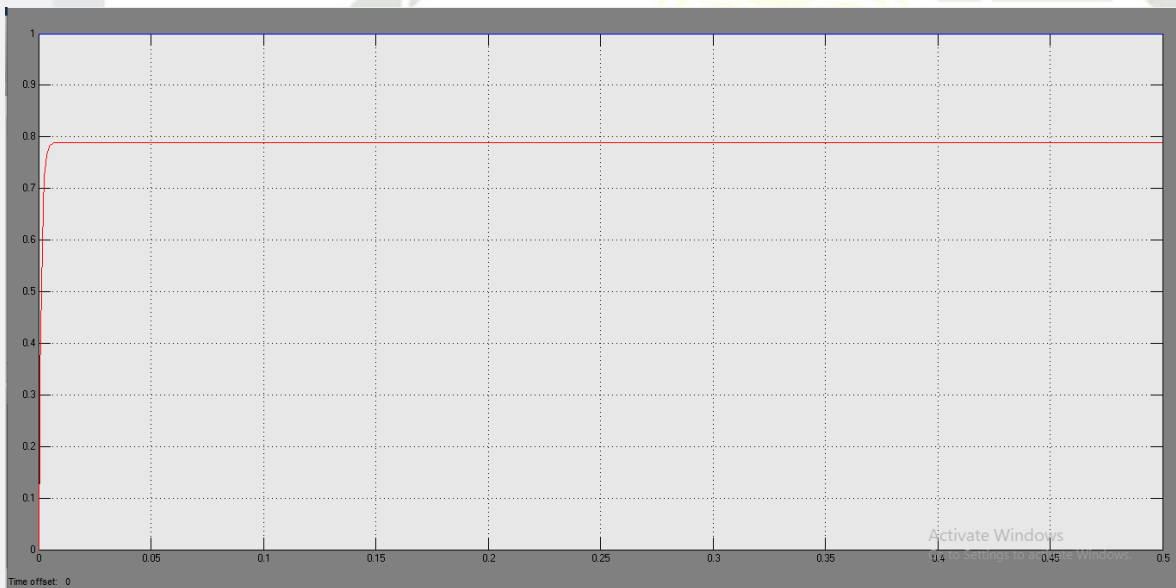
14. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.4$  dan  $R = 1$



15. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.5$  dan  $R = 1$

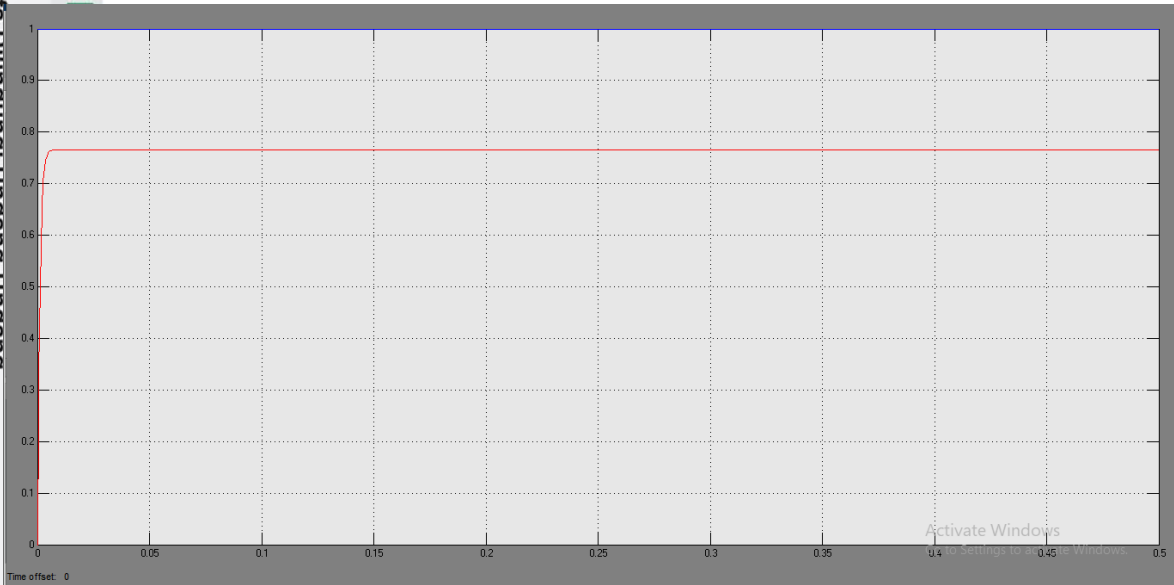


16. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.6$  dan  $R = 1$

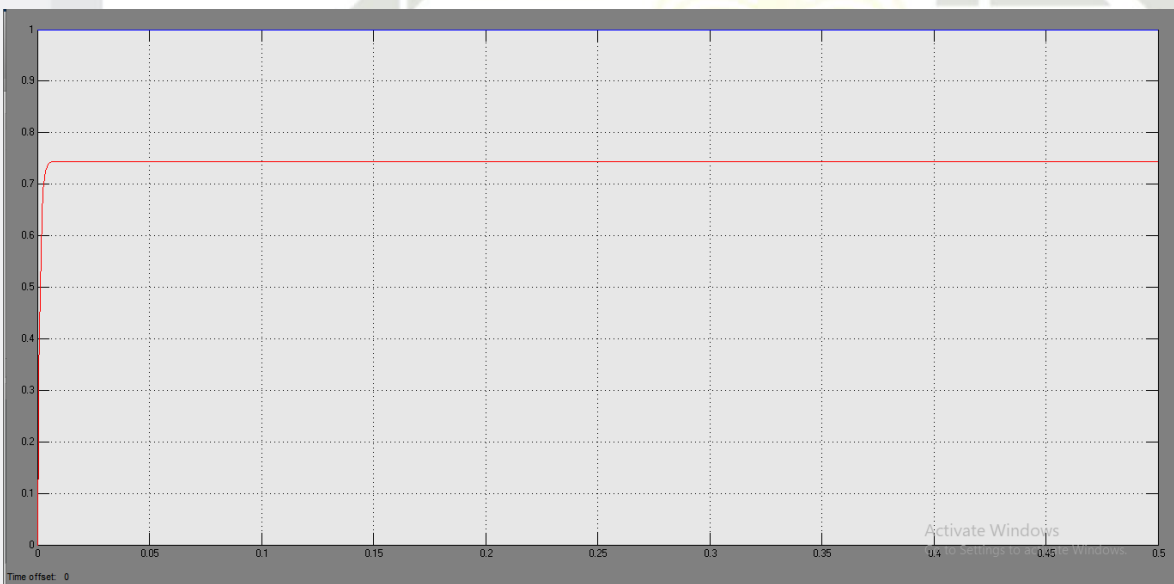




17. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.7$  dan  $R = 1$



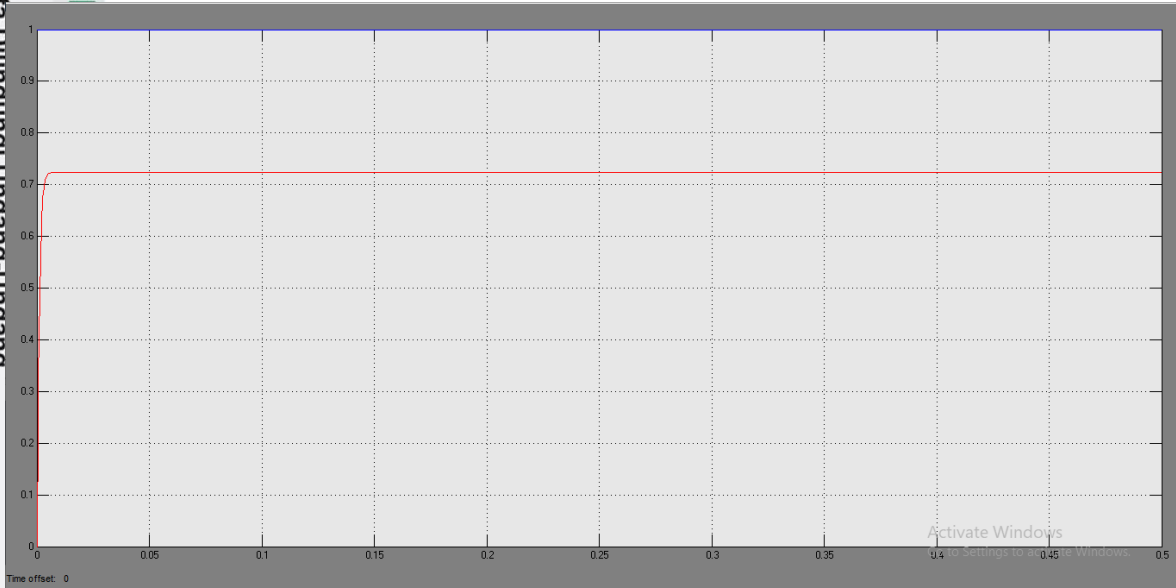
18. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.8$  dan  $R = 1$



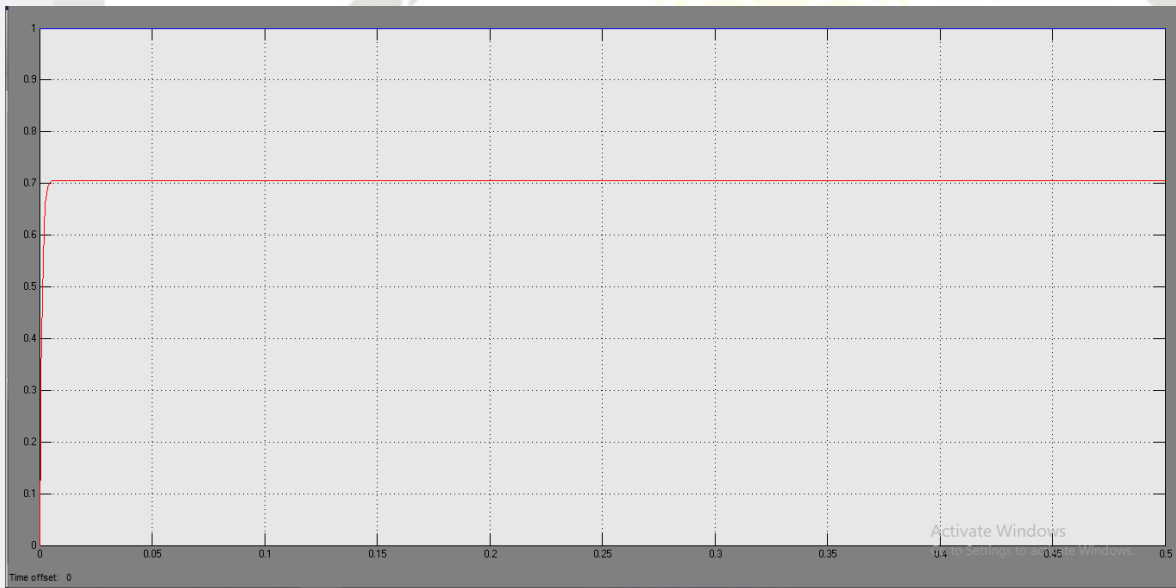
UIN SUSKA RIAU

19. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 1.9$  dan  $R = 1$

Hak Cipta Diinindungi Undang-Undang



20. Hasil simulasi LQR dengan  $Q = 2$  dan  $R = 1$

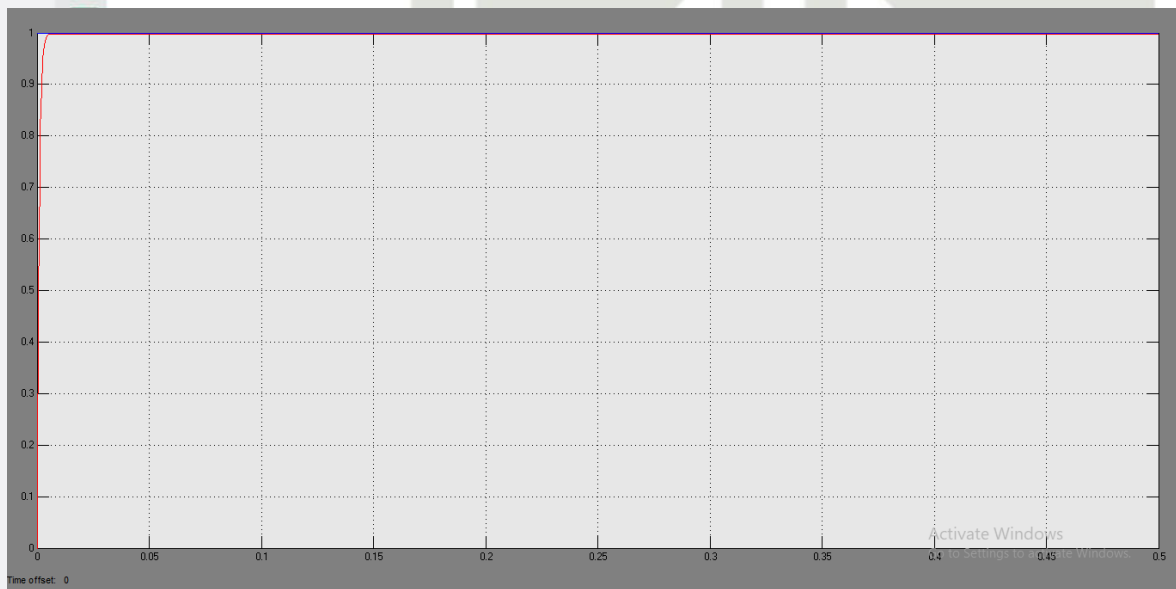


## LAMPIRAN C

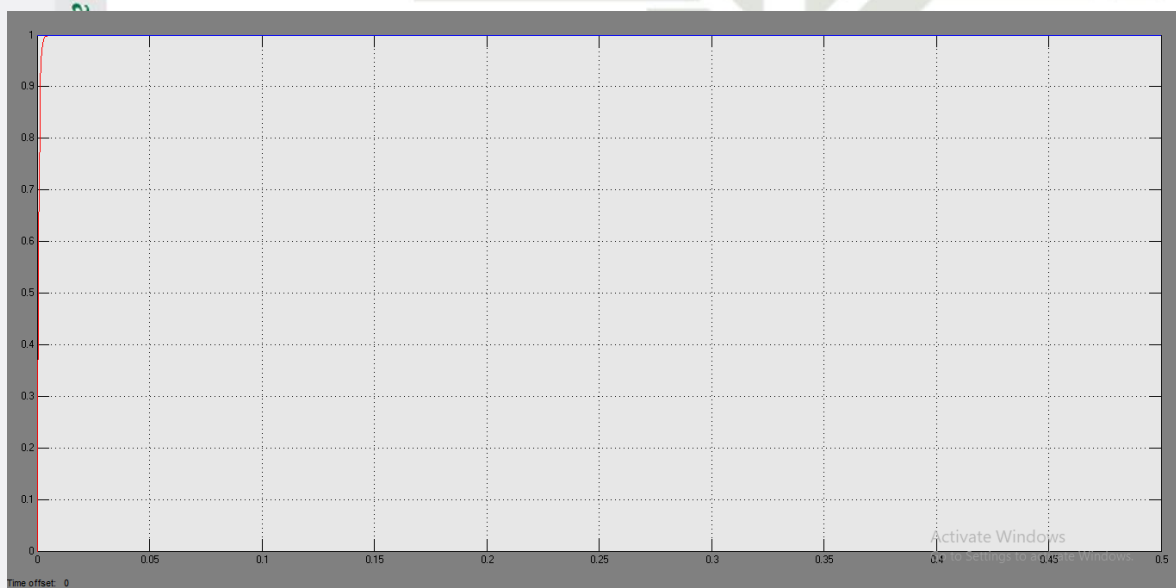
### HASIL SIMULASI TUNNING LQR-PD

#### PROSES TUNNING $K_p$ DAN $K_d$ PADA PENGENDALI LQR KOMBINASI PD UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC

1. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 0.5$  dan  $K_d = 0$



2. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 1$  dan  $K_d = 0$

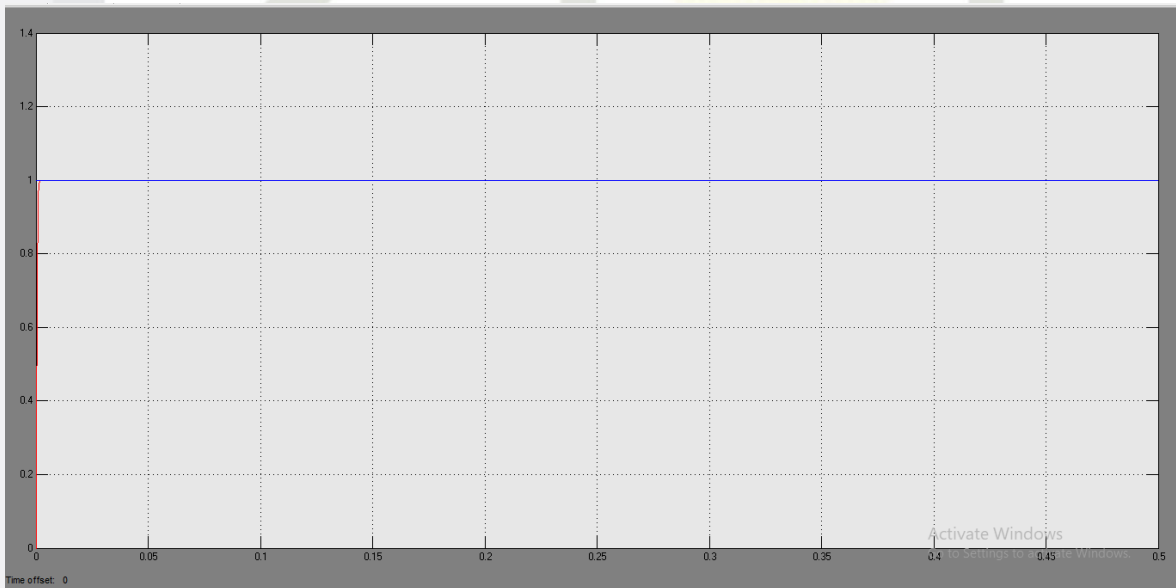




Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 1.5$  dan  $K_d = 0$

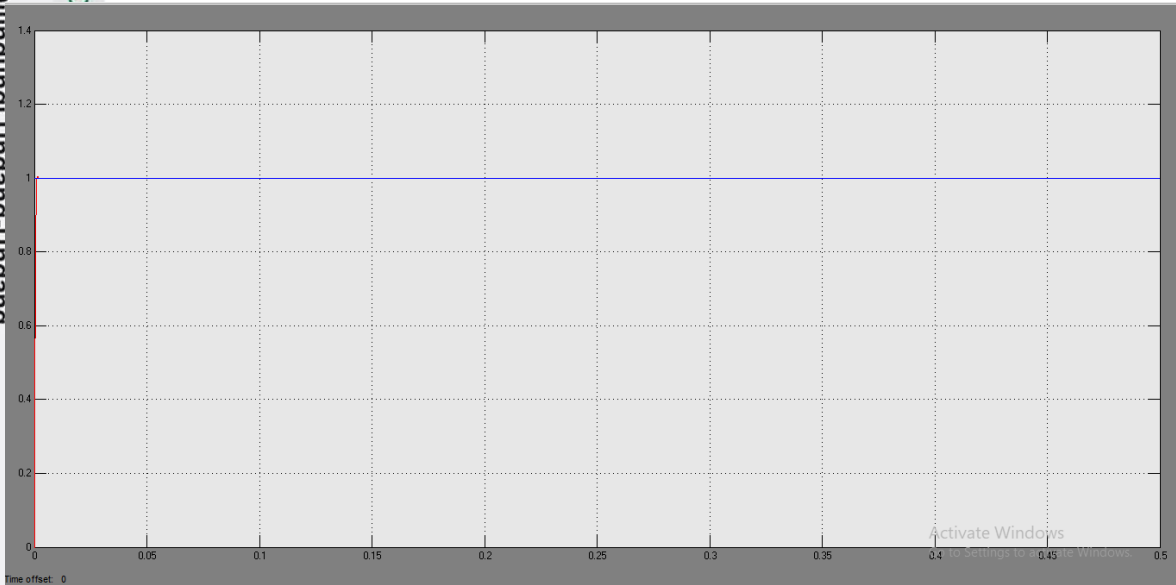
Hak Cipta Diinang-Unaang-Unaang

4. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 2$  dan  $K_d = 0$

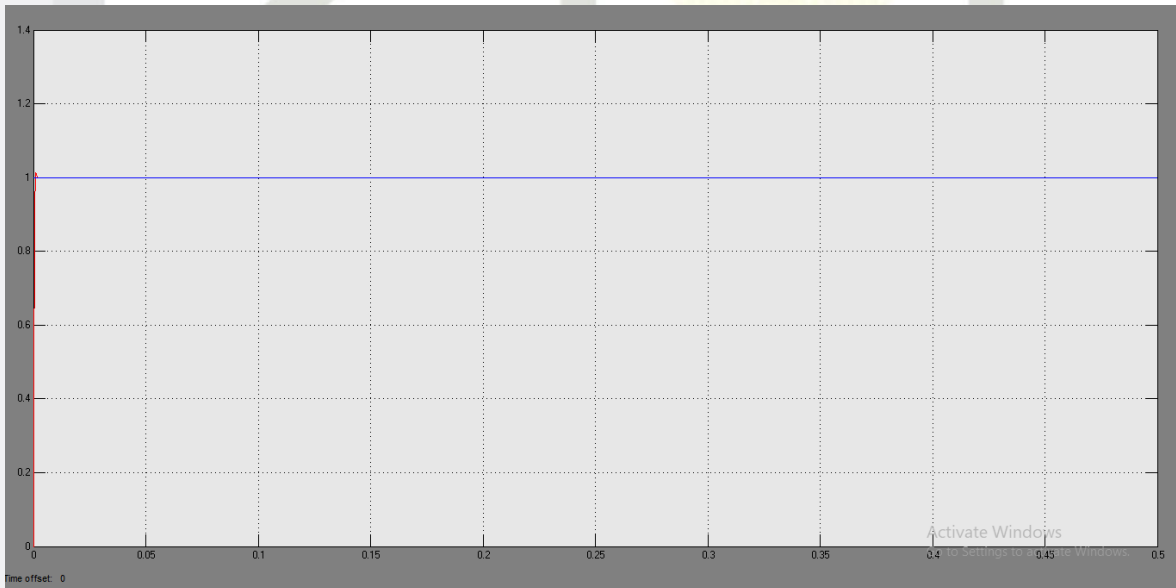


Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 2.5$  dan  $K_d = 0$

Hak Cipta Diinang-Unaang

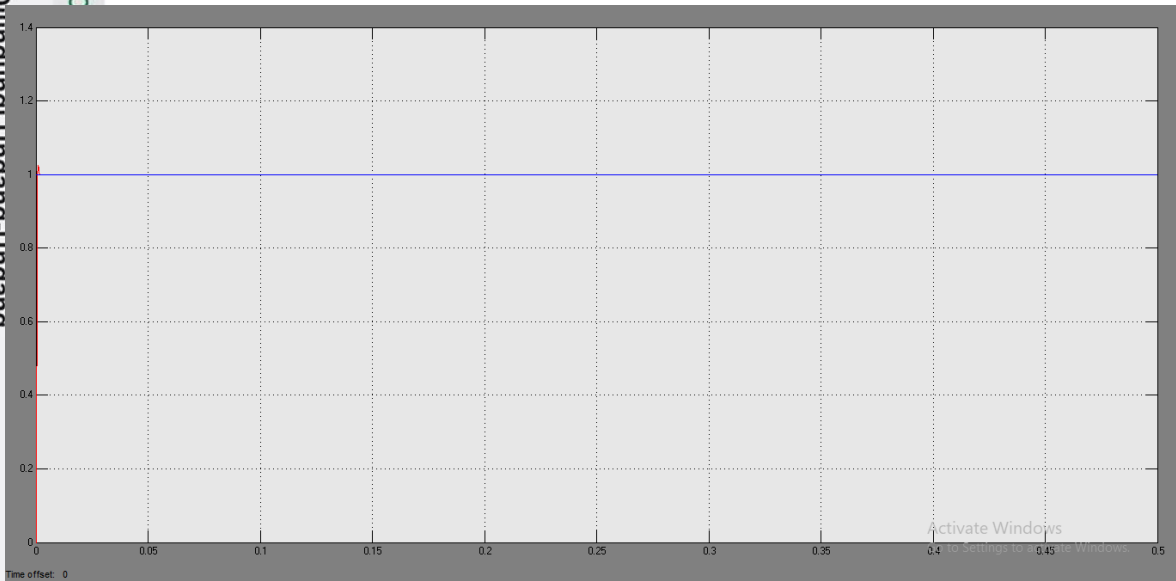


6. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 3$  dan  $K_d = 0$

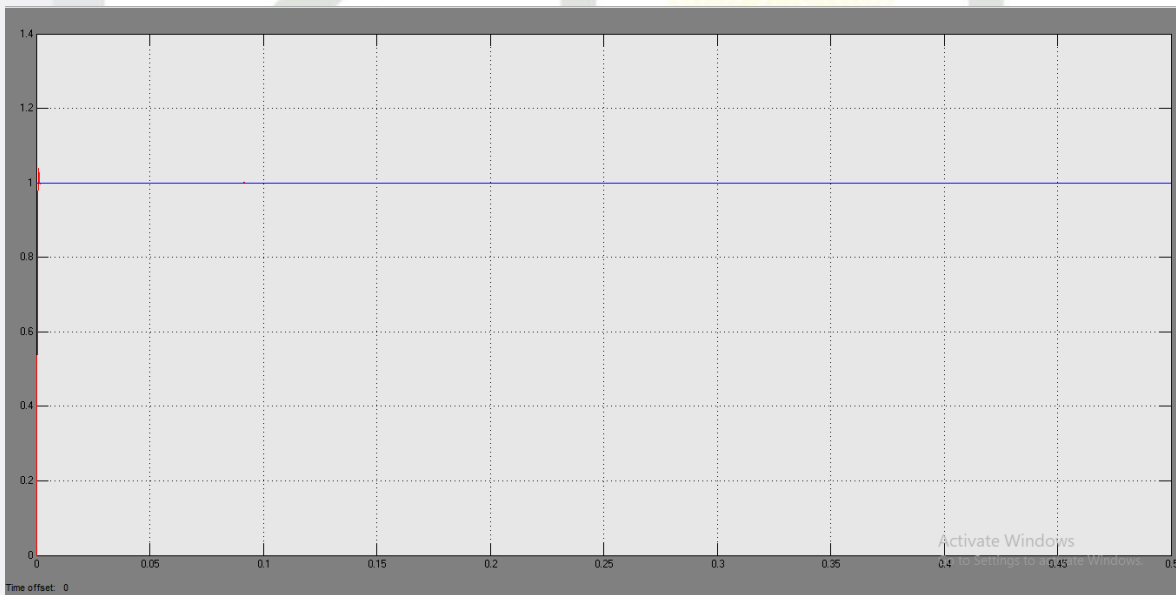


1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 3.5$  dan  $K_d = 0$



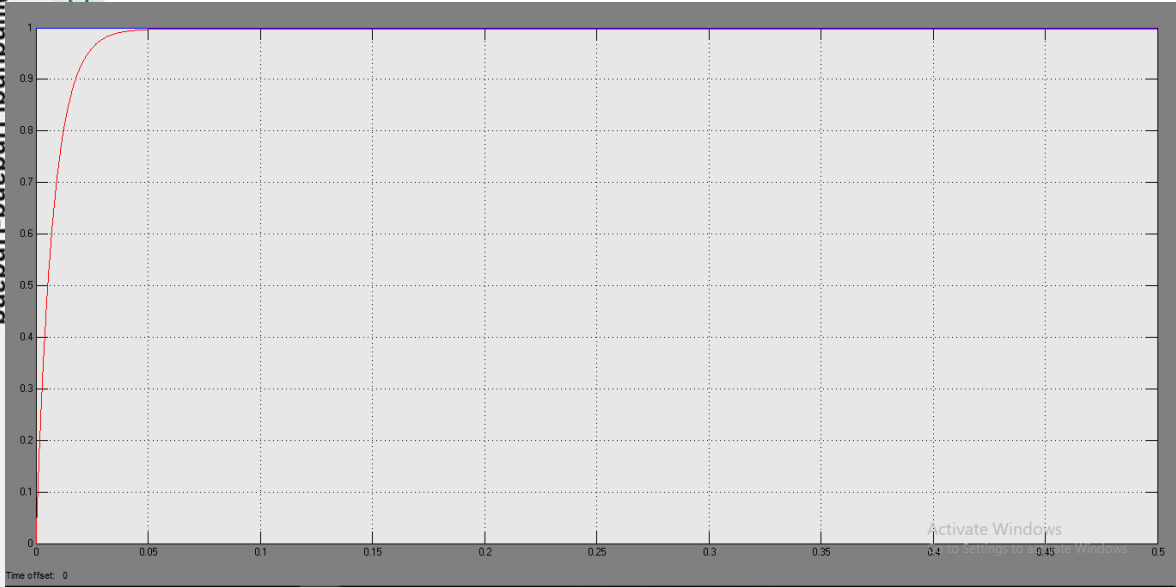
8. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 4$  dan  $K_d = 0$



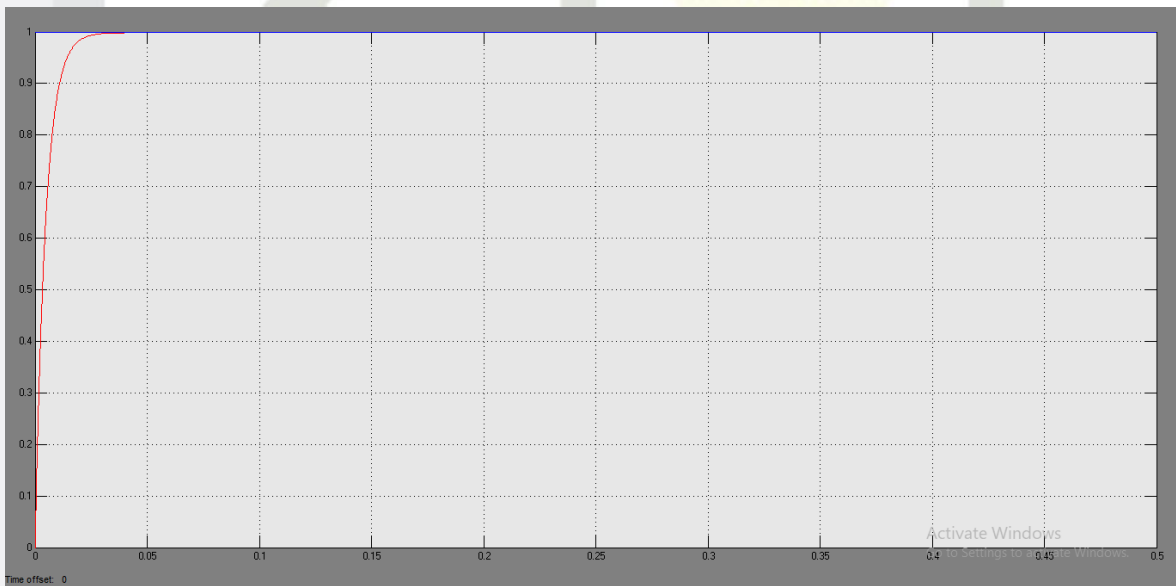


Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 0.5$  dan  $K_d = 0.01$

Hak Cipta Diinang-Unaang-Unaang

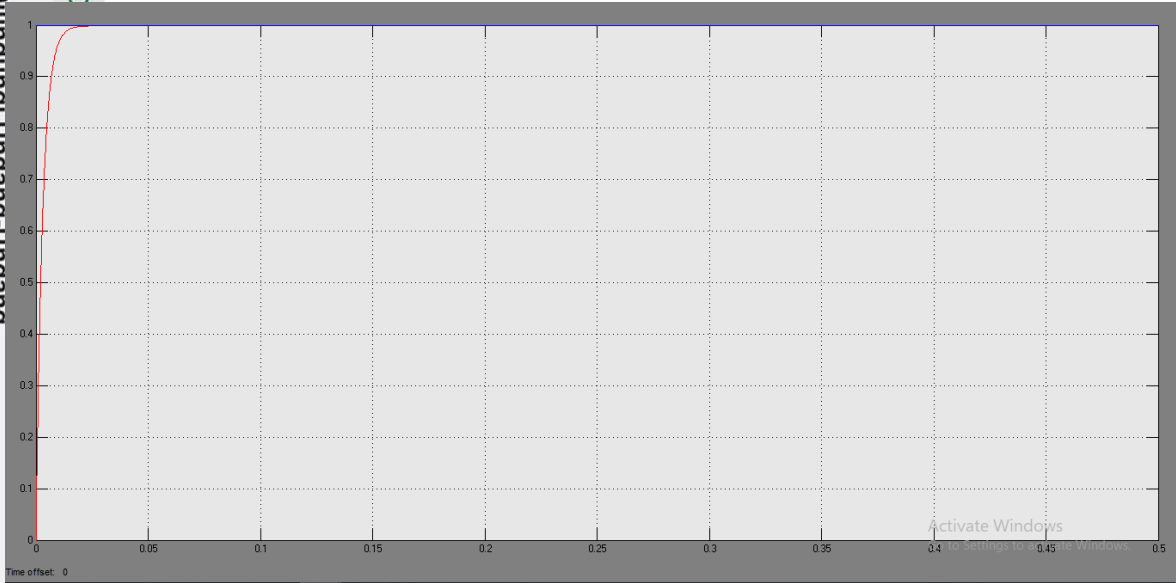


10. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 1$  dan  $K_d = 0.0008$

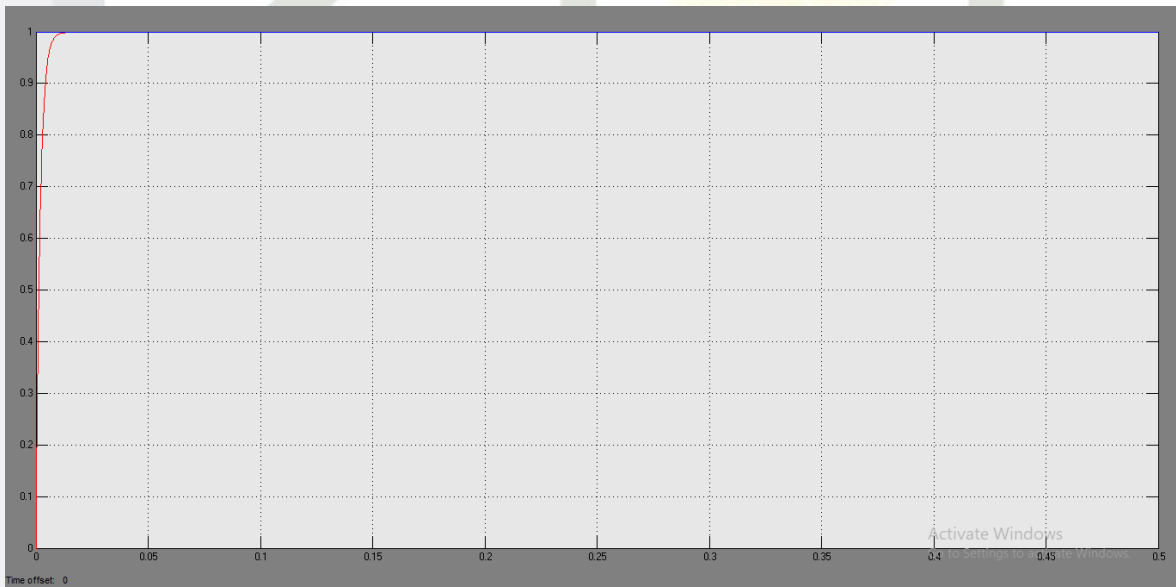


UIN SUSKA RIAU

11. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 1.5$  dan  $K_d = 0.0006$

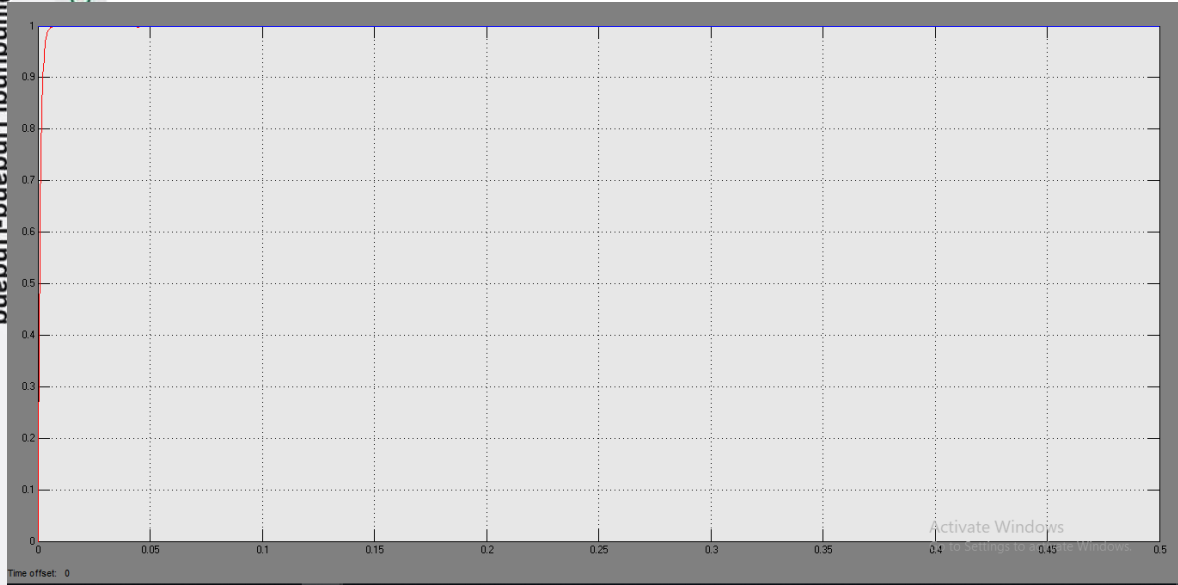


12. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 2$  dan  $K_d = 0.0004$

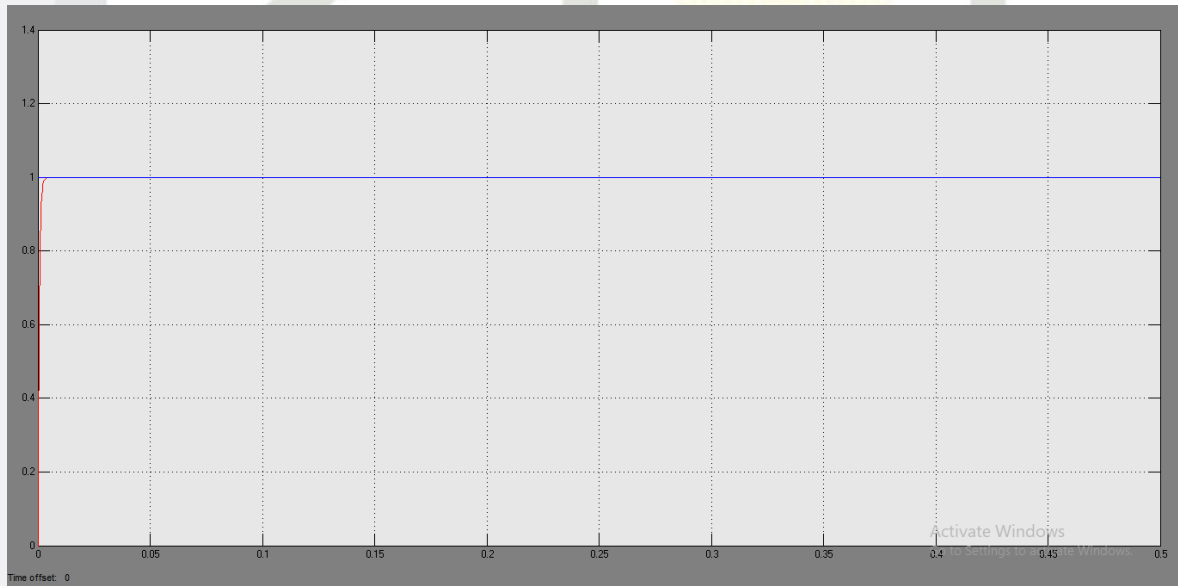


1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

13. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 2.5$  dan  $K_d = 0.0002$

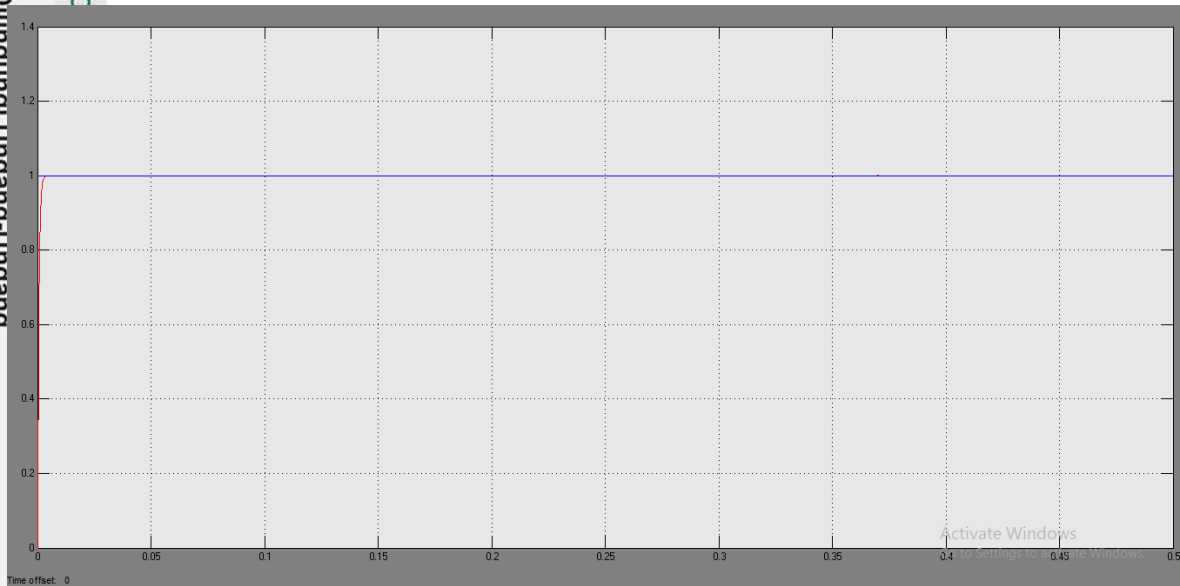


14. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 3$  dan  $K_d = 0.0001$

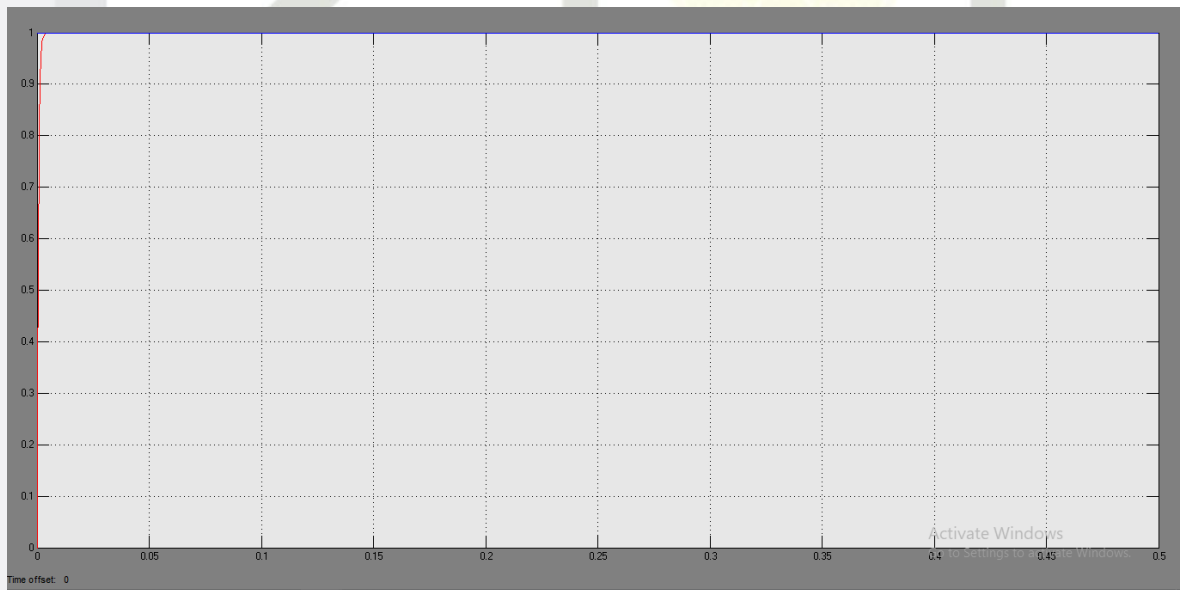




15. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 3.5$  dan  $K_d = 0.0013$



16. Hasil simulasi pengendalian kecepatan motor brushless DC menggunakan LQR-PD dengan nilai  $K_p = 4$  dan  $K_d = 0.0016$



1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



## BIOGRAFI

Nama penulis Syafri Yandi Oksia Putra, penulis lahir di Duri di kecamatan Mandau kabupaten Bengkalis, Penulis merupakan anak pertama dari lima bersaudara, penulis memiliki 3 adik laki-laki dan 1 perempuan, Ibu penulis bernama Efnida Yenti yang merupakan seorang ibu rumah tangga dan ayah penulis bernama Syahrial yang merupakan pedagang. Adapun jenjang pendidikan penulis dimulai dari SD 029 Gajah Sakti yang mana di tahun 2003 sampai 2009, kemudian melanjutkan studi di SMP 04 Mandau yang lulus di tahun 2012, kemudian melanjutkan di SMA 02 Mandau yang lulus di tahun 2015, pada tahun 2016 melanjutkan pendidikan ke UIN Suska dengan program studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi yang Alhamdulillah Lulus di tahun 2021

Dengan izin Allah SWT, kemauan keras, dan motivasi dorongan dari beberapa pihak akhirnya penulis menyelesaikan tugas akhir yang berjudul: **“Perancangan Kendali Hybrid Linear Quadratic Regulator (LQR)-PD Pada Kecepatan Motor Brushless DC”**

Penutup penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar besarnya kepada Allah SWT yang telah memberikan nikmat kesehatan, kekuatan, dan kehidupan sehingga penulis sampai ketahap ini